

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
(код і назва)

на тему: _____
Неохолоджуваний фотовольтаїчний перетворювач ІЧ-діапазону на
основі гетероструктури Si/CdHgTe _____

Виконав: студент VI курсу, групи ДП-62м
(шифр групи)

_____ (прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. _____

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В. _____

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 95 сторінках, вона містить 5 розділів, 29 ілюстрацій, 25 таблиць і 49 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження став неохолоджуванний фотовольтаїчний перетворювач ІЧ-діапазону на основі гетероструктури CdHgTe/Si.

Предмет роботи – дослідження спектральних та оптичних характеристик фотоперетворювачів на основі CdHgTe/Si, розробка теоретичної моделі неохолоджуваного ІЧ-детектора на основі гетероструктури CdHgTe/Si.

Метою даної роботи є розробка теоретичної моделі фотодетектора інфрачервоного випромінювання із використанням п'єзоелектричного ефекту в гетероструктурі кадмій-ртуть-телур (КРТ) на підкладці Si, що працює без використання кріогенного охолодження.

В першому розділі подано огляд літератури, в якому розглядається теоретичні основи роботи та характеристики приймачів ІЧ-випромінювання.

В другому розділі роботи проводився аналіз матеріалів, технологічних методів синтезу КРТ та їх аналогів, та був зроблений огляд їх основних фізичних властивостей та параметрів фотоприймачів на їх основі.

В третьому розділі наведені синтез плівок гетероструктури на основі КРТ, аналіз структурних, спектральних та оптичних характеристик.

В четвертому розділі було проведено розробку теоретичної моделі неохолоджуваного ІЧ-детектора на основі гетероструктури CdHgTe/Si.

В п'ятому розділі було представлено розробку старт-ап проекту.

НЕОХОЛОДЖУВАНИЙ ФОТОВОЛЬТАІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ,
ГЕТЕРОСТРУКТУРА, ІЧ-ДЕТЕКТОР, ДЕФОРМАЦІЯ, П'ЄЗОВЛАСТИВОСТІ,
CdHgTe.

ABSTRACT

The work presented on 95 pages consists of 5 parts, 29 figures, 25 tables and 49 sources in the list of references.

IR uncooled photovoltaic converter based on CdHgTe/Si heterostructure were the object of the study.

The subject of the work is research of the spectral and optical properties of photoconverters based on CdHgTe/Si, development of theoretical model of uncooled IR-detector based on CdHgTe/Si.

The purpose of the work is the development of theoretical model of the IR-photodetector using piezoelectric effect in heterostructure cadmium-mercury-tellurium (CMT) on silicon, which works without cryogenic cooling.

The first chapter provides a literature review, which addresses theoretical basics of work and characteristics of IR-receivers.

In the second section of the review common materials, technological synthesis methods of CMT and their analogs as well as main physical properties and parameters of based on this materials photoconverters were discussed.

The third section includes synthesis of films of heterostructures based on CMT, analysis of structural, spectral and optical properties.

The fourth section includes the development of theoretical model of uncooled IR-detector based on CdHgTe/Si.

In the fifth section, startup project was presented.

UNCOOLED PHOTOVOLTAIC CONVERTER, HETEROSTRUCTURE, IR-DETECTOR, DEFORMATION, PIEZOPROPERTIES, CdHgTe.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП.....	6
1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЙМАЧІВ ІЧ- ВИПРОМІНЮВАННЯ	7
1.1. Теплові приймачі випромінювання	7
1.2. Фотонні приймачі випромінювання	20
1.3. Шумові характеристики ІЧ приймачів	31
2. ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ТА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІЧ-ФОТОПРИЙМАЧІВ	34
2.1. Тверді розчини CdHgTe	34
2.2. Тверді розчини PbSnTe та InSb	48
3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОХОЛОДЖУВАНОВОГО ІЧ-ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ CdHgTe/Si.....	54
3.1. Синтез, структура та хімічний склад плівок CdHgTe та гетероструктур на їх основі	54
3.2. Електрофізичні характеристики плівок CdHgTe та гетероструктур на їх основі	62
3.3. Оптичні властивості плівок CdHgTe та фотоприймачів на їх основі	66
4. РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕОХОЛОДЖУВАНОВОГО ІЧ- ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ CdHgTe/Si.....	69
5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	80
5.1. Опис ідеї проекту.....	80
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту	81
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	82
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	86
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	88
5.6. Висновки.....	89
ВИСНОВКИ.....	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСМ – атомно-силова мікроскопія
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ВІС – велика інтегральна схема
ГЕС – гетероепітаксіальна структура
ЕРС – електрорушійна сила
ЕЕС – еквівалентна електрична схема
ІЧ – інфрачервоне випромінювання
ККД – коефіцієнт корисної дії
КРТ – кадмій-ртуть-телур
КЦТ – кадмій-цинк-телур
МДРТ – мінімально дозволена різниця температур
МПЕ – молекулярно-променева епітаксія
МФПП – матричний фотоприймальний пристрій
НВІС – надвелика інтегральна схема
НС – надзвичайна ситуація
ОПЗ – область просторового заряду
ПЗ – програмне забезпечення
ППІ – піроелектричний приймач ІЧ-випромінювання
СОТ – свинець-олово-телур
ТГС – тригліцин сульфат
ФЕП – фотоелектричний перетворювач
ФПП – фотоприймальний пристрій
ЧЗН – часова затримка й накопичення сигналів
BLIP – background limited performance (обмежена фоном ефективність)
CPE – constant phase element (елемент з постійною фазою)
FPA – focal plane array (двовимірний матричний фотоприймальний пристрій)

LWIR – long wavelength infrared region (дальній ІЧ-діапазон хвиль)

MWIR – middle wavelength infrared region (середній ІЧ-діапазон хвиль)

NEP – noise equivalent power (еквівалентна шуму потужність сигналу)

NETD – noise equivalent temperature difference (еквівалентна шуму різниця температур)

SFPA – staring focal plane array (матричний фотоприймальний пристрій слідкуючого типу)

ВСТУП

Довгий час приймачі інфрачервоного (ІЧ) випромінювання застосовувались головним чином лише в областях спеціального призначення, тому в першу чергу увага приділялась оптимізації їх чутливості, просторової й часової роздільності. При цьому цінова доступність ігнорувалась. На сьогодні комерційні й державні галузі (медицина, служби примусу й порятунку, транспорт, і т.п.) проявляють все більшу зацікавленість до «доступних» ІЧ приймачів. Цивільний ринок формує вимоги до цін, розмірів, зручності в користуванні й відповідно на другий план відходять такі параметри, як чутливість, еквівалентна шуму різниця температур, інерційність приймачів.

За принципом дії фото приймальні пристрої ІЧ-діапазону розділяють на дві групи – фотонні і теплові. Цінова політика фотонних детекторів, як правило, жорстко прив'язана до систем охолодження та термостатування. Теплові приймачі ІЧ випромінювання менш чутливі, більш інерційні порівняно з фотонними приймачами, але працюють при кімнатній або близькій до кімнатної температурі й відносно дешеві, що визначає їх конкурентну здатність й масштабність використання в різних областях. В цілому можна виділити декілька головних задач, що на сьогоднішній момент є актуальними для розробників «доступних» фотоприймачів ІЧ діапазону:

- оптимізація фотонних приймачів для роботи при кімнатних температурах;
- створення матриць теплових ІЧ приймачів і досягнення граничних характеристик;
- створення приймачів інфрачервоного випромінювання на зовсім нових принципах і підходах.

Тому метою даної роботи було створення фотовольтаїчного ФПП ІЧ-випромінювання без охолодження на основі напруженої гетероструктури CdHgTe/Si.

1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЙМАЧІВ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1. Теплові приймачі випромінювання

Важливими властивостями теплових приймачів, що визначають в багатьох випадках доцільність їх застосування, є придатність для абсолютних вимірювань енергії випромінювання і сталість чутливості в дуже широкій області спектра.

Принцип дії теплових приймачів ґрунтується на вимірюванні потужності випромінювання, що поглинається, за виникаючою зміною температури і залежними від неї рівноважними параметрами матеріалу – форми, провідності тощо. Для того, щоб падаюче випромінювання поглиналось повністю, достатньо покрити поверхню приймача будь-яким не відбиваючим покриттям. Істотно, що до цих покриттів висувається лише вимога мінімального відбиття у якомога більш широкій спектральній області.

Найбільш зручними є черноти, що складаються з металевих мікрокристалів в середньому розміром у 2-5 нм. Вони практично повністю поглинають випромінювання в діапазоні частот $50\text{-}50000\text{ см}^{-1}$ (довжини хвиль від 0,2 мм до 200 нм) [1].

У низькочастотній частині цього діапазону, середній і дальній ІЧ-області спектра (частоти менше 5000 см^{-1}) теплові приймачі є основним видом приймачів для спектроскопії. У видимій та ультрафіолетовій області (частоти вище 13000 см^{-1}) вони використовуються тільки в спеціальних випадках як неселективні або абсолютні [1].

За принципом дії, тобто способом перетворення температури у вимірюваний електричний сигнал, теплові приймачі діляться на термоелементи, болометри, піроелектричні та оптико-акустичні (пневматичні) приймачі.

Основні параметри теплових приймачів. Чутливість (вольт-ватна чутливість) може бути визначена тільки коефіцієнтом перетворення потужності

випромінювання в електричний сигнал (В/Вт). Чим вища чутливість, тим, зазвичай, простішим є підсилювальний тракт для роботи з приймачем.

Пороговий потік. Потужність шумів приймача пропорційна розміру приймального майданчика і ширині реєстрованої смуги частот підсилювального тракту, оскільки спектр шумів – безперервний. Вимірюється, щоправда, не потужність вихідного сигналу, а електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна кореню квадратному з потужності. Відтак, шум є пропорційним кореню зі смуги пропускання. Порогова чутливість зазвичай приводиться до одиничної площі приймача й до ширини смуги пропускання вимірювального тракту у 1 Гц. Для кращих теплових приймачів, що працюють за кімнатної температури, пороговий потік складає приблизно 10^{-10} Вт/Гц^{1/2}, що є близьким до теоретичної межі, обумовленої тепловими шумами за даної температури [2].

Постійна часу (τ) теплових приймачів відносно велика, так що для реєстрації швидкозмінних процесів вони непридатні. З іншої сторони, навіть постійний світловий потік бажано модулювати для того, щоб зменшити потужність шумів типу $1/f$. Для зменшення τ приймальні майданчики намагаються робити якомога легшими. Вдається виготовляти високочутливі теплові приймачі з постійною часу порядку 0.05 с, що дозволяє працювати на частоті модуляції близько 10 Гц [2].

Теорія теплових приймачів. Неосвітлений приймач знаходиться в стані теплової рівноваги з навколишнім середовищем. Його приймальний майданчик має температуру T_0 .

При поглинанні світловий потік підвищує його температуру до T_1 , що супроводжується переносом тепла від приймального майданчика до середовища. Перенос тепла тим більший, чим більша різниця $\Delta T = T_1 - T_0$. Ріст температури освітленого приймального майданчика припиниться, коли встановиться баланс (рівність) між потоком енергії, що переноситься на майданчик світлом, та потоком тепла від нагрітого майданчика до оточення. Є три канали обміну тепловою енергією між приймальним майданчиком та оточенням: теплове випромінювання (в інфрачервоній області спектра),

теплопровідність газового оточення й теплопровідність елементів конструкції, які підтримують майданчик й забезпечують електричне з'єднання [1]:

$$W = S\sigma (T_1^4 - T_0^4) + SA(T_1 - T_0) + B(T_1 - T_0), \quad (1.1)$$

де W – потужність світлового потоку;

S – повна площа приймального майданчика;

σ , A , B – константи, що характеризують випромінювальну здатність приймального майданчика, теплопровідність газу й теплопровідність несучих елементів відповідно.

Оскільки $\Delta T = T_1 - T_0$ завжди мала, з (1.1) маємо [1]:

$$W \approx (4S\sigma T^3 + SA + B) \Delta T = \beta \Delta T, \quad (1.2)$$

де $\beta = 4S\sigma T^3 + SA + B$ – коефіцієнт, що характеризує сумарну тепловіддачу. Або [1]:

$$\Delta T = W/\beta \quad (1.3)$$

Очевидно, що чим менше β , тим вище вольт-ватна чутливість приймача. При виготовленні високочутливих приймачів площу приймального майданчика прагнуть зменшити, його поміщують у вакуум, зменшують теплопровідність елементів конструкції. Зменшення площі й вакуумування приймача понижує також і шуми, а з ними – й пороговий потік.

Однак, одночасно збільшується інерційність приймача [1]:

$$\tau = cm/\beta, \quad (1.4)$$

де c – питома теплоємність приймального майданчика;
 m – маса майданчика.

Для зменшення постійної часу використовують конструкції з мінімальною теплоємністю, але іноді доводиться штучно збільшувати теплопровідність елементів конструкції або збільшувати конвекційне охолодження, відмовляючись від вакуумування [1].

Термоелементи. Термоелементи – найбільш розповсюджений вид теплових приймачів. У найпростішому варіанті термоелемент являє собою термопару, один зі спаїв якої знаходиться у тепловому контакті з приймальним майданчиком.

В основі принципу дії термопари лежить ефект Зеебека.

Ефект Зеебека – явище виникнення електрорушійної сили між двома контактами різних провідників, які перебувають за різних температур.

Явище виникнення напруги в металевому бруску, кінці якого мали різну температуру, випадково відкрив у 1821 р. Томас Зеебек.

Ефект Зеебека виникає в колі, яке складається із двох спаяних між собою провідників (термопара). Один із контактів нагрівають, і тоді в колі виникає електричний струм. Різниця потенціалів (електрорушійна сила), яка виникає між контактами, залежить від роду провідників контактів та від різниці температури між контактами. Її можна подати у вигляді загальної формули [3]:

$$\varepsilon = f(T_1) - f(T_2), \quad (1.5)$$

де $T_1 > T_2$ – відповідні температури контактів термопари.

Похідна функції $f(T)$ $\alpha = \frac{df(T)}{dT}$ називається коефіцієнтом термоелектрорушійної сили контакту.

Коефіцієнт термоелектрорушійної сили контакту можна подати у вигляді різниці двох величин, які характеризують матеріал провідника [3]:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (1.6)$$

Коефіцієнти α_i називають коефіцієнтами Зеебека або коефіцієнтами терморушійної сили речовини. Загалом ці коефіцієнти залежать від температури, й навіть можуть міняти знак при її зміні.

При нагріванні майданчика в електричному колі виникає термо-ЕРС (V_t), пропорційна різниці температур холодного і нагрітого кінців термопари [2].

$$V_t = E_t \Delta T = E_t W / \beta, \quad (1.7)$$

де E_t – диференціальна термо-ЕРС.

Вольт-ватна чутливість термопари тим більше, чим більше E_t . Будь-яка пара різнорідних провідних матеріалів характеризується певним визначеним значенням E_t , зазвичай дуже малим, менше 1мкВ/К [2]. Але деякі поєднання виявляють більші значення E_t . Для металів і сплавів з металевим типом провідності максимальні значення E_t досягаються для термопар складу вісмут-сурма (100 мкВ/К) і хромель-копель (60 мкВ/К). Для контактів з напівпровідниками термо-ЕРС можуть бути ще вище (для CuO-Cu₂O E_t = 1900 мкВ/К), однак ростуть і шуми.

Чутливість практично використовуваних термоелементів досягає 2-20 В/Вт. Враховуючи реальні значення чутливості, порогового потоку ($\sim 10^{-10}$ Вт) і термо-ЕРС, легко переконатися, що зміна температури приймального майданчика має порядок 10^{-2} - 10^{-3} К навіть при світлових потоках, що в 1000-100 раз перевищують пороговий рівень [2]. Очевидно, що необхідно приймати спеціальні заходи для зменшення впливу нестабільності температури навколишнього середовища на вихідний сигнал приймача. Практично завжди використовується метод компенсації: приймач виконується як комбінація двох ідентичних термоелементів, включених назустріч один одному. Вимірюване випромінювання направляється на приймальний майданчик одного термоелемента, в якому генерується термо-ЕРС корисного сигналу. Термо-ЕРС, викликані нестабільністю температури, генеруються в обох термоелементах і компенсуються тим точніше, чим ближче їх характеристики. Флуктуації

температури належать до великого класу шумів зі спектральною густиною $1/f$ (f – частота). Найбільшу амплітуду в такому шумі мають низькочастотні складові, і без фільтрації шум цього типу проявляється як «дрейф» показів реєструючого приладу. Його величина і знак змінюються в часі. Ефективним засобом придушення такого шуму є реєстрація попередньо модульованого випромінювання з вузькосмуговим підсиленням на частоті модуляції. Для цього необхідно використати достатньо мало інерційні приймачі.

Зрозуміло, що поряд з термокомпенсацією й модуляцією випромінювання використовуються звичайні засоби термостатування: герметизація і екранування приймача за допомогою відповідного кожуха. Для довготривалого підтримання вакууму в балоні він зазвичай оснащується адсорбційним поглиначем, який грає роль постійно діючого насоса.

Якщо світловий потік не можна або незручно фокусувати на малий приймальний майданчик, роблять так звані термостовпчики (термобатареї), з'єднуючи послідовно необхідна кількість термоелементів, щоб перехопити весь світловий потік.

Підсилення електричного сигналу від термоелемента представляє непросте завдання, оскільки мала вихідна напруга термоелемента поєднується з малим внутрішнім опором, порядку десяти Ом. Для підсилення постійних мікрохвильових напруг від таких джерел використовуються гальванометричні (фотокомпенсаційні) підсилювачі; при підсиленні на змінному струмі – спеціальні вибірккові підсилювачі [2].

Болометри. Іншим розповсюдженим типом неселективних приймачів випромінювання є болометр. По суті, болометр – це терморезистор, тобто резистор, опір якого залежить від температури.

В найпростішому варіанті болометр має таку конструкцію: закріплена на двох електродах тонка металева стрічка. В якості болометра може бути використана лампа розжарювання.

При опроміненні стрічка нагрівається й змінюється її опір, що й слугує мірою поглиненої світлової потужності випромінювання [2]:

$$r_{ph} = r (1 + \alpha \Delta T) = r (1 + W\alpha / \beta), \quad (1.8)$$

де r – опір не освітлюваної стрічки болометра;

r_{ph} – її опір при освітленні;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу стрічки.

Якщо болометр підключити до джерела напруги U послідовно з великим опором R , на ньому виникає напруга сигналу U_{ph} [2]:

$$U_{ph} = r (1 + W\alpha / \beta) U / R = r (1 + W\alpha / \beta) I, \quad (1.9)$$

Однак такий спосіб включення болометра наскільки простий, настільки ж незручний, так як зазвичай величина $W\alpha / \beta \ll 1$ і малий корисний сигнал, що несе інформацію щодо світлового потоку, виявляється стоячим на великій безкорисній і, отже, шкідливій «підставці». «Підставка» не залишається строго постійною, так як величини U , R , I , β , r , залежать від температури навколишнього середовища, від напруги мережі та цілого ряду інших погано контрольованих факторів. В тому числі – від наявності чи відсутності протягів у приміщенні, що впливає на теплообмін балона болометра із оточенням.

Не потрібну «підставку» можна прибрати або використанням мостової схеми з двома ідентичними болометрами, або модуляцією (періодичним перериванням) світлового потоку й зміною тільки змінної складової напруги сигналу U_{ph} . Зазвичай обидва метода використовуються одночасно.

Декілька слів щодо конструкції реальних болометрів, виборі матеріалів і величини струму живлення.

Стрічки болометра, так само, як і термоелемент, монтують зазвичай в скляному балоні, обладнаному черговим адсорбційним насосом й вікном з матеріалу, прозорого в потрібній спектральній області. Балон поміщається в металевий екран.

Формули легко показують, що чим більше температурний коефіцієнт α при інших рівних умовах, тим краще. Для переважної більшості чистих металів

температурний коефіцієнт опору майже однаковий і складає $(4...5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [2]. Така одноманітність обумовлена однаковістю механізму розсіювання електронів, прискорюваних електричним полем. Для чистих металів переважаючий механізм розсіювання – розсіювання на фононах. Концентрація фононного газу росте із ростом температури для всіх речовин практично однаково.

Таким чином, з точки зору величини α майже однаково, який з чистих металів ми обираємо.

Для сплавів α завжди менше, ніж для металів, що входять до їх складу, так як в сплавах має місце ще один механізм розсіювання електронів – розсіювання на дефектах кристалічної структури, концентрація яких від температури не залежить. Серед сплавів є й такі, де розсіювання на фононах практично не грає ролі порівняно з розсіюванням на дефектах. Це високоомні сплави з майже нульовим температурним коефіцієнтом опору (константан, манганін), що використовуються для виготовлення прецизійних резисторів, зокрема, резисторів мостової схеми болометра. У всякому випадку, на роль оптимальних матеріалів для виготовлення стрічок болометра сплави претендувати не можуть.

Також зазначимо, що для виготовлення прецизійних резисторів використовується, головним чином, манганін, у якого температурний коефіцієнт α більше, ніж у константана, але зате він легко змочується олов'яними припоями і не має термо-ЕРС в парі з міддю.

Великий від'ємний температурний коефіцієнт опору можуть мати напівпровідники, де згадані вище причини залежності (або незалежності) опору від температури відступають на другий план порівняно з експоненціальною температурною залежністю концентрації вільних носіїв заряду. Провідність напівпровідника σ [2]:

$$\sigma \approx T^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (1.10)$$

де ΔE – ширина забороненої зони. У домішковому напівпровіднику замість $\Delta E/2$ фігурує ще менша величина.

Однак напівпровідникові болометри застосовуються досить рідко.

Тепер щодо величини опору r та вибору металу для його виготовлення. Розміри стрічки болометра (довжина, ширина) обираються виходячи з розмірів перерізу світлового пучка на виході монохроматора (тобто виходячи з розмірів вихідної щілини монохроматора або розмірів її зображення), а товщина – з міркувань достатньої механічної міцності та жорсткості. Таким чином, задача зводиться до вибору металу, для якого величина питомого опору ρ була б максимальною, а теплопровідність – мінімальною.

Піроелектричні приймачі. В наш час основним засобом реєстрації випромінювання дальнього ІЧ-діапазону ($\lambda = 8 \dots 14$ мкм) є напівпровідникові приймачі, робота яких ґрунтується на генерації світлом носіїв заряду за механізмом «зона-зона». Тому використовувані в даних цілях матеріали є вузькозонними: CdHgTe – КРТ, PbSnTe – СОТ і т. п. [4]. Мала ширина забороненої обумовлює ряд недоліків цих приймачів: високий рівень шумів, що викликає необхідність їх глибокого охолодження; складність в організації режиму накопичення; низькі відтворюваність і надійність; низька стійкість до радіації та впливу навколишнього середовища; трудомісткість створення елементів в інтегральному виконанні, що визначає їх високу вартість.

Перспективними для усунення вказаних недоліків є широкозонні піроелектричні приймачі ІЧ-випромінювання (ППП), такі як кристали титанату барію BaTiO₃ з домішками, тригліцин сульфату (NH₂CH₂COOH)₃H₂SO₄ або ТГС, ніобіт літію LiTiO₃ і т. д. [4].

Піроелектричний ефект полягає в тому, що значення спонтанної поляризації, що спостерігається у піроелектричного кристала за відсутності зовнішнього поля, залежить від температури, зі зміною якої на гранях кристалів, перпендикулярних до полярної вісі, можуть бути знайдені поверхневі заряди.

Різновид піроелектриків – сегнетоелектрики – володіють оберненою спонтанною поляризацією.

Для піроелектриків характерною є наявність одного або декількох фазових переходів, яка характеризується поглинанням, виділенням теплоти і зміною питомого об'єму, причому один стан змінюється на інший. Так, у кристала BaTiO_3 декілька фазових переходів, але лише один з них при охолодженні до точки Кюрі є піроелектричним, в результаті якого кубічна ґратка переходить в тетрагональну і він спонтанно поляризується.

В залежності від напрямку вектора поляризації розрізняють піроелектричні приймачі повздовжнього (вектор напрямлений вдовж полярної вісі) та поперечного типів. Якщо у приймачів повздовжнього типу вище чутливість, то у приймачів поперечного типу постійна часу менша на два порядки ($\tau_n = 10^{-7} \dots 10^{-8}$ с).

По відношенню до вузькозонних напівпровідникових пристроїв ППІ володіють рядом переваг:

- можливістю ефективної реєстрації випромінювання $\lambda = 8 \dots 15$ мкм без охолодження;
- високою швидкістю ($10^{-11} \dots 10^{-12}$ с);
- широким спектральним діапазоном ($10^{-5} \dots 10^3$ мкм);
- слабкою чутливістю до впливу радіації та наявності домішок (до 0,1%), що обумовлює високу технологічність;
- високою надійністю;
- відсутністю необхідності в джерелі живлення для піроприймача;
- високим опором приймачів, що обумовлює більш низький рівень струмових шумів, а отже, більш ефективну їх роботу в режимі накопичення;
- широким динамічним діапазоном ($10^7 \dots 10^8$).

Аналіз залежностей детектуючої здатності D^* від довжини хвилі випромінювання показує, що для області довжин хвиль $8 \dots 14$ мкм параметри реальних напівпровідникових приймачів відрізняються від параметрів

ідеального приймача більше ніж на два порядки, в той час як для теплових приймачів ця відмінність знаходиться в межах одного порядку величини D^* [4].

Вдосконалення неохолоджуваних фотонних приймачів обмежено високими темновими струмами внаслідок фізичних механізмів, що визначають фоточутливість елементів даного класу, і є практично нездійсненним.

Принципових фізичних обмежень для досягнення граничних характеристик у теплових приймачів немає, а їх удосконалення визначається рівнем розвитку технології, застосуванням високоякісних підсилювачів та оптимальним узгодженням їх параметрів із параметрами піроприймачів.

При створенні багатоелементних тепловізійних систем піроелектричні приймачі мають додаткові переваги перед вузькозонними фотоприймачами. Це пов'язано з тим, що основним режимом роботи таких пристроїв є часова затримка й накопичення, що найбільш ефективно реалізовується на пристроях із зарядовим зв'язком.

До недоліків цього методу реєстрації теплового випромінювання відносяться низька ефективність заповнення фокальної площини зображення, що сканується, недостатня ефективність здійснення режиму накопичення, який дозволяє покращити відношення сигнал-шум порівняно з окремим приймачем тільки в \sqrt{M} , де M – кількість елементів. Окрім того, темнові струми у вузькозонних матеріалах приводять до швидкого заповнення потенціальних ям ПЗЗ фоновим сигналом, що створює великі технологічні та схемотехнічні труднощі, подолання яких приводить до підвищення рівня шумів, а це викликає необхідність глибокого охолодження приймача.

Застосування багатоелементних сегнетоелектричних пристроїв безпосередньо в інтегральних мікросхемах, розташованих на поверхні кремнієвої пластини, дозволяє суттєво підвищити вихідні характеристики системи. В [4] така гібридна система володіє параметрами, що відповідають пристрою на глибоко охолоджуваному КРТ: мінімально дозволена різниця температур (МДРТ) рівна 0,25 К за роздільної здатності 10 лін./мм.

Виготовлення чутливих елементів ППП у вигляді тонких плівок в одному технологічному циклі одночасно з польовими транзисторами та іншими елементами ВІС дозволяє збільшити кількість елементів у фокальній площині, краще узгодити параметри приймача і підсилювача, що приводить до підвищення просторової роздільної здатності.

Невелика товщина сегнетоелектричного шару дозволяє реалізувати високі робочі частоти, для яких характерним є низький рівень шумів, і перейти від режиму накопичення тепла до режиму накопичення заряду. Окрім того, при реєстрації імпульсного випромінювання робота тонкоплівкових приймачів більш ефективна (із зменшенням товщини сегнетоелектрика його чутливість зростає).

В [4] описується тонкоплівковий піроелектричний приймач на базі сегнетоелектрика PbTiO_3 товщиною 2,5 мкм. Детектуюча здатність зразка за смуги 1 Гц на частотах 20 і 5 Гц складає $1,5$ і $6 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Тобто вже перші роботи у напрямку застосування тонких сегнетоелектричних плівок у приймальних пристроях ІЧ-випромінювання показують, що їх детектуюча здатність близька до детектуючої здатності піроелектричних кристалів.

Використання сегнетоелектричних плівок у багатоелементних пристроях має ряд характерних особливостей. Створення багатоелементних піроелектричних пристроїв засобами технології мікроелектроніки пов'язане з необхідністю оптимізації товщини піроелектрика. Однак зменшення товщини є обмеженим: характером залежності від її сегнетоелектричних властивостей; зменшенням ефективності поглинання енергії випромінювання за рахунок збільшення частки втрат енергії в електродах; ускладненням реалізації високочастотної модуляції.

Збільшення товщини обмежено: підвищенням внутрішніх напружень в плівці, що призводять зрештою до її відриву від підкладки; ускладненням проведення фотолітографії; тепловим характером процесів, що визначають приймання зображення; збільшенням ємності міжелементних з'єднань та вхідних ємностей транзисторів. За заданих розмірів чутливих елементів

відносне зменшення ємності цих елементів зі зростанням товщини призводить до зменшення корисного сигналу. Тобто піроелектричні матеріали з малою величиною ε не можуть бути ефективно використані при створенні великих тепловізійних систем.

Таким чином, побудова високоякісних тепловізійних систем є більш перспективним на матеріалах з високими значеннями ε і відповідно γ . Однак при створенні тепловізійних систем 3-го покоління збільшується кількість елементів у фокальній площині (до 10^5 і більше), що пов'язано з різким зменшенням ефективності використання корисного сигналу.

Визначення оптимальної товщини сегнетоелектрика дає можливість розрахунку інших параметрів тепловізійного пристрою. Найбільш суттєвий параметр тепловізійного пристрою МДРТ визначається виразом [4]:

$$МДРТ = 1,48 \cdot 10^4 C N \sqrt{kT \varepsilon \varepsilon_0 \nu_{\text{п}} / \gamma}, \quad (1.11)$$

де N – кількість кадрів в секунду; γ – піроелектричний коефіцієнт в Кл·м⁻²·град; $\nu_{\text{п}}$ – просторова частота в лін./см; C – теплоємність одиниці об'єму матеріалу сегнетоелектрика.

Покладаючи $N = 25$, $T = 300$ К, отримуємо оцінку МДРТ $\approx 0,013$ К. Вона значною мірою ідеалізована, оскільки не враховує ступеня чорноти досліджуваного об'єкта і поверхні приймача, втрат при реєстрації сигналу, внеску в підвищення чутливості за рахунок зовнішніх оптичних елементів. Точне визначення МДРТ можливе лише з урахуванням конкретних параметрів всіх вузлів системи.

Важливим фактором, що визначає ефективність використання сегнетоелектричних плівок, є їхня технологічна сумісність із конструкцією сучасних НВІС. Мова йде про створення на поверхні кремнієвих шайб якісно іншого (за хімічним складом, досконалістю структури, необхідністю орієнтації певним чином кристалографічних осей, температурним коефіцієнтом лінійного

розширення) компонента зі специфічними умовами його синтезу: високою температурою підкладки, впливом електронного та іонного бомбардування, тривалістю процесу і т. п. Дослідження плівок, синтезованих на поверхні кристалів кремнію, показало, що за піроелектричною і основною сегнетоелектричною властивостями вони близькі до відповідних властивостей кристалів; спостерігається й незмінність поверхневих станів.

При глибокому охолодженні теплових приймачів, як відомо, незначно покращується їхня детектуюча здатність в силу широкої області спектральної чутливості. Однак за низької температури фону, наприклад при роботі в космосі, D^* теплових приймачів різко зростає до $10^{12} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ і більше, причому у всьому спектральному діапазоні [4]. Близькі параметри мають, наприклад, болометри, охолоджені до 2...3 К. Створення піроприймачів, здатних функціонувати за настільки низьких температур, є принципово здійсненним.

1.2. Фотонні приймачі випромінювання

Фотонний приймач (фотоприймач) – оптоелектронний прилад для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію. Під дією оптичного випромінювання відбувається зміна електрофізичних параметрів фотоприймача, обумовлена утворенням додаткових вільних носіїв заряду в напівпровіднику. Цей процес називається внутрішнім фотоелектричним ефектом або фотоефектом.

Для того, щоб поглинутий напівпровідником фотон випромінювання створював носії електричного заряду або фотоносії, його енергія W_ϕ повинна бути достатньою для переходу електрона з валентної зони в зону провідності.

Робота існуючих приймачів випромінювання ґрунтується на двох формах внутрішнього фотоефекту: фотогальванічному та ефекті фотопровідності [5].

Фотогальванічний ефект виникає в напівпровідниках із внутрішнім потенційним бар'єром (таких як р-n-перехід, перехід метал-напівпровідник, гетероперехід). У зазначених структурах внутрішнє електричне поле переходу розділяє фотоносії, які виникли під дією оптичного випромінювання, що створюють фото-ЕРС. Це явище лежить в основі роботи основної маси фотоприймачів: фотодіодів, фототранзисторів, фототиристорів та інших напівпровідникових структур.

Явище фотопровідності відрізняється від фотогальванічного ефекту тим, що поділу фотоносіїв не відбувається, а зміна їхньої концентрації впливає на провідність напівпровідника. На цьому ефекті працюють фоторезистори.

Фотоприймачі із зовнішнім фотоефектом. Зовнішній фотоефект відкрив Герц у 1887 р., але лише у 1902 р. Ейнштейн пояснив це явище. Енергія фотона [6]:

$$E = hU = hc/\lambda, \quad (1.12)$$

де h – постійна Планка;
 c – швидкість світла у вакуумі;
 λ – довжина хвилі фотона.

Фотон, що поглинається фотокатодом, віддає свою кінетичну енергію електрону метала, а той може подолати роботу виходу й вийти у вакуум.

Найнижчу роботу виходу серед металів (1.9 eV) має цезій. Так як енергія фотона залежить від частоти, то існує певна «червона межа» фотоефекту [6]:

$$\lambda = 1.24/\varphi, \quad (1.13)$$

де φ – робота виходу електрона з поверхні фотокатода.

Фотоелектронна емісія, а отже, і фотострум фотоелемента залежить від довжини хвилі світлового випромінювання, тому, крім інтегральної чутливості,

користуються поняттям спектральної чутливості. Спектральною чутливістю називають відношення фотоструму до світлового потоку заданої довжини хвилі.

Залежність чутливості фотоелемента від довжини хвилі падаючого на фотоелемент світлового потоку постійної величини називається спектральною характеристикою елемента.

При збільшенні напруги фотострум спочатку росте швидко, а потім зростання його уповільнюється і, нарешті, майже зовсім припиняється.

Фотоприймачі із внутрішнім фотоефектом. У найбільш розповсюджених фотоприймачах, що працюють в ІЧ-діапазоні, використовуються різні види внутрішнього фотоефекту у напівпровідниках.

Напівпровідники мають електроопір, що при $T = 300$ К лежить в межах від $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^9$ Ом·см. Таким чином, напівпровідники за опором знаходяться між провідниками ($\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см) та діелектриками (від $\sim 1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{22}$ Ом·см) [6].

При абсолютному нулі ($T = 0$ К) чисті й ідеальні кристали більшості напівпровідників мають бути ізоляторами; їх характерні напівпровідникові властивості проявляються при тепловому збудженні та наявності домішок або дефектів.

Власна провідність. Якщо виключити область наднизьких температур, напівпровідники високого ступеня чистоти часто проявляють так звану власну провідність, яку слід відрізнити від домішкової провідності менш чистих зразків. У зв'язку з цим введемо поняття температурної області власної провідності як області температур, де на електричні властивості напівпровідника наявність в кристалі домішок суттєво не впливає.

На рис. 1.1 приведена схема електронних енергетичних зон, що пояснює виникнення власної провідності. При $T = 0$ К провідність відсутня.



Рисунок 1.1 – Схема електронних енергетичних зон, де E_g – ширина забороненої зони [6]

Стани валентної зони заповнені, всі стани зони провідності вільні. По мірі збільшення температури провідність збільшується внаслідок теплового збудження електронів, що приводить до переходу цих електронів у зону провідності, де вони можуть рухатись, а на їх місці у валентній зоні залишаються позитивно заряджені дірки. За наявності електричного або магнітного поля дірки можуть рухатись аналогічно електронам, але в протилежному напрямку. В чистому напівпровіднику перехід електрона в зону провідності створює електронно-діркову пару носіїв заряду, що підвищує провідність. Так поведуть себе кремній та германій.

При температурах нижче області власної провідності електричні властивості напівпровідника визначаються домішками. У цьому випадку говорять про домішкову, або невластну провідність.

Валентні електрони можуть отримати від падаючих фотонів енергію, достатню для утворення електронно-діркових пар. В результаті під впливом фотонного потоку змінюється провідність. Такі перетворювачі називаються фотоопорами.

Як і у випадку приймачів випромінювання, що ґрунтуються на зовнішньому фотоефекті, існує довгохвильова межа, за якою енергія фотона недостатня для створення пари. Порогова довжина хвилі [6]:

$$\lambda_c = 1.24 / E_g, \quad (1.14)$$

де E_g – ширина забороненої зони.

Всі відомі фотоперетворювачі з власною провідністю мають $E_g \geq 0.18$ еВ (при $T = 300$ К). Відповідно, $\lambda_c \geq 7.00$ мкм [6]. Напівпровідники з власною провідністю: кремній, германій, сульфід свинцю, селенід свинцю, арсенід індію, антимонід індію.

Для зсуву межі в сторону більш довгих хвиль необхідні матеріали з більш вузькою шириною забороненої зони. Звичайним способом пониження E_g є легування основного матеріалу іншими матеріалами (в невеликих кількостях). Отримані таким чином матеріали називають невластими, або домішковими.

Фоторезистори. Фоторезистори являють собою напівпровідникові прилади, електричний опір яких різко змінюється під дією падаючого на них світлового випромінювання.

У якості напівпровідників в фоторезисторах застосовують сірчистий свинець (фоторезистор ФСА), селенід кадмію (фоторезистор ФСД), сірчистий кадмій (фоторезистор ФСК).

Фоторезистори ФСА застосовуються в інфрачервоній, а інші – у видимій області світла. Чутливість фоторезисторів значно вище чутливості фотоелементів із зовнішнім фотоелементом, тому в низці обладнань фоторезистори заміняють раніше використовувані фотоелементи із зовнішнім фотоелементом.

Фоторезистор являє собою (рис. 1.2, а) скляну пластинку 1, на яку нанесений тонкий шар напівпровідника 2, покритий прозорим лаком для захисту від механічних ушкоджень і вологи. По краях виведено два металеві електроди 3. Фоторезистор поміщений у пластмасовий корпус із двома ніжками, до яких приєднуються електроди. Умовне позначення й схема включення фоторезистора показані на рис. 1.2, б.

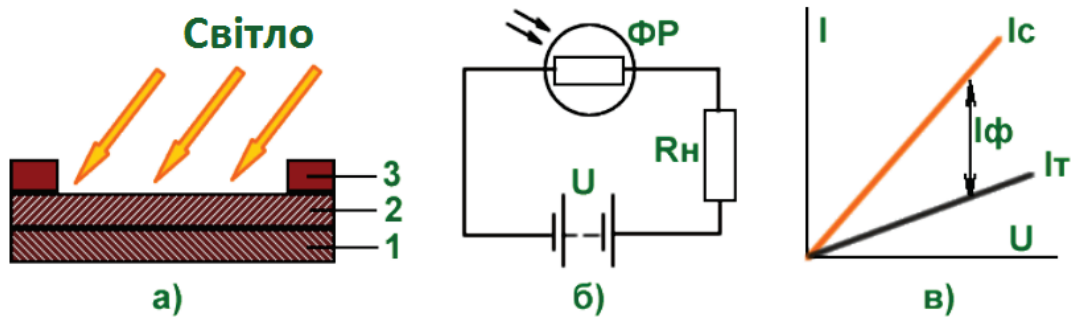


Рисунок 1.2 – Фоторезистор: *а* – будова; *б* – схема включення й умовне графічне позначення; *в* – вольт-амперна характеристика [6]

Фоторезистор працює тільки від зовнішнього джерела живлення й має однаковий опір в обох напрямках.

Неосвітлений фоторезистор має більший «темновий» опір R_m (від сотень кілоом до декількох мегаом) і через нього проходить малий «темновий» струм I_m .

При освітленому фоторезисторі його опір різко зменшується й струм збільшується до деякого значення I_c , що залежить від інтенсивності освітлення. Різниця між струмами при освітленні й «темновим» називається фотострумом, тобто $I_\phi = I_c - I_m$.

Вольт-амперна характеристика фоторезистора (рис. 1.2, в), тобто залежність фотоструму від напруги джерела живлення при незмінному світловому потоці $I_\phi = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$ лінійна. Видно, що пряма затіненого струму більш полого, ніж освітленого. Це говорить про меншу чутливість неосвітленого елемента.

До недоліків фоторезисторів належить їхня інерційність (при освітленні фотострум не одразу досягає свого кінцевого значення, а лише через якийсь час), нелінійність світлової характеристики (фотострум зростає повільніше, ніж сила світла), залежність електричного опору й фотоструму від температури навколишнього середовища.

Фоторезистори застосовуються при низьких інтенсивностях світла. Вони можуть витримувати високі робочі напруги до 200-300 В при малому споживанні потужності – до 300 мВт.

Фоторезистори використовуються для вимірювання інтенсивності світла у фотографічному устаткуванні, в охоронних датчиках, в обладнаннях автоматичного відкривання дверей.

Фотодіоди. Фотоелементи з фотоефектом у шарі замикання, що називаються вентильними фотоелементами, мають шар замикання між напівпровідниками з p - і n -провідностями. У цих фотоелементах під впливом світлового випромінювання виникає ЕРС, що називається фото-ЕРС.

Для виготовлення вентильних фотоелементів застосовують селен, сірчистий талій, сірчисте срібло, германій і кремній.

Освітлення поверхні фотоелемента поблизу p - n -переходу викликає іонізацію атомів кристала й утворення нових пар вільних носіїв зарядів – електронів і дірок.

Під дією електричного поля p - n -переходу електрони, що утворюються в результаті іонізації атомів кристала, переходять у шар n , а дірки – у шар p , що приводить до надлишку електронів у шарі n і дірок у шарі p .

Під дією різниці потенціалів (фото-ЕРС) між шарами p і n у зовнішньому ланцюзі проходить струм I , спрямований від електрода p до електрода n . Цей струм залежить від кількості носіїв зарядів – електронів і дірок, тобто від сили світла.

Чутливість вентильних фотоелементів висока (до 10 мА/лм) [6], вони не вимагають джерела живлення й знаходять широке застосування в різних областях електроніки, автоматики, вимірювальної техніки і т.д. Будова кремнієвого фотоелемента із шаром замикання показана на рис. 1.3.

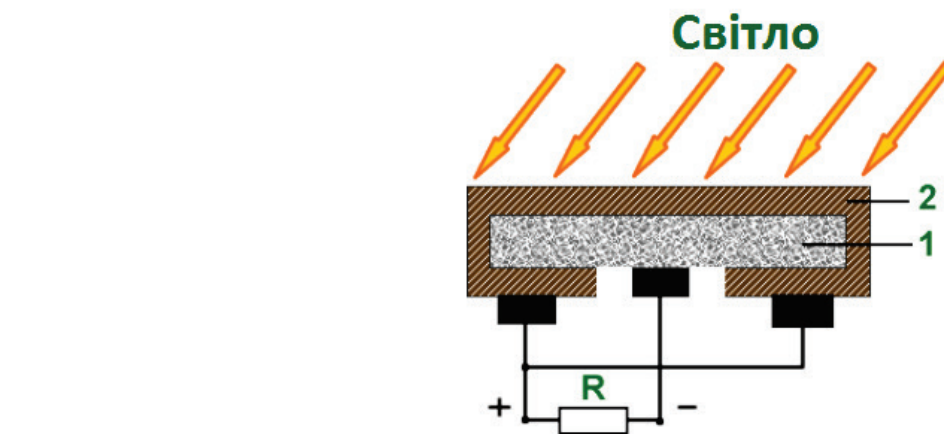


Рисунок 1.3 – Будова вентильного фотоелемента [6]

На пластину кремнію 1 з домішкою, що створює електронну провідність, вводять домішку бору шляхом дифузії у вакуумі, у результаті цього утворюється шар напівпровідника з дірковою провідністю 2 дуже малої товщини, тому світлові промені вільно проникають у зону переходу.

Батареї кремнієвих елементів знаходять застосування для безпосереднього перетворення сонячної енергії в електричну. Такі перетворювачі, названі сонячними батареями, застосовують, наприклад, на штучних супутниках Землі для живлення їх апаратури.

Напівпровідниковий фотоелемент із двома електродами, розділеними p - n -переходом, називається фотодіодом, і може працювати як із зовнішнім джерелом живлення (перетворювальний режим), так і без зовнішнього джерела (генераторний режим).

При роботі в генераторному режимі фотодіода його освітлення викликає виникнення фото-ЕРС, під дією якої в зовнішньому ланцюзі через навантаження проходить струм, тобто джерелом живлення є фотодіод.

При роботі у фотоперетворювальному режимі напруга зовнішнього джерела живлення прикладена зустрічно до фото-ЕРС і фотодіод є подібним фоторезистору з більш високою чутливістю.

Якщо фотодіод не освітлений, то через нього проходить невеликий зворотний струм (темновий струм) під дією зовнішнього джерела живлення. При освітленні електронної області фотодіода утворюються носії зарядів –

електрони й дірки. Дірки доходять до p - n -переходу й під дією електричного поля переходять у p -область, тобто освітлення викликає збільшення кількості неосновних носіїв, що перейшли з n -області в p -область, і, отже, струм у ланцюзі зростає (виникає фотострум).

Фототранзистори. Фототранзистор являє собою тришаровий напівпровідниковий прилад із двома p - n -переходами, що володіє властивістю посилення фотоструму при впливі енергії випромінювання.

Фототранзистор, як правило, виконаний у вигляді звичайного площинного транзистора з германія або кремнію. Світловий потік падає на базу, тому емітер роблять тонким, невеликих розмірів.

На рис. 1.4, а представлена двополюсна схема включення фототранзистора структури p - n - p .

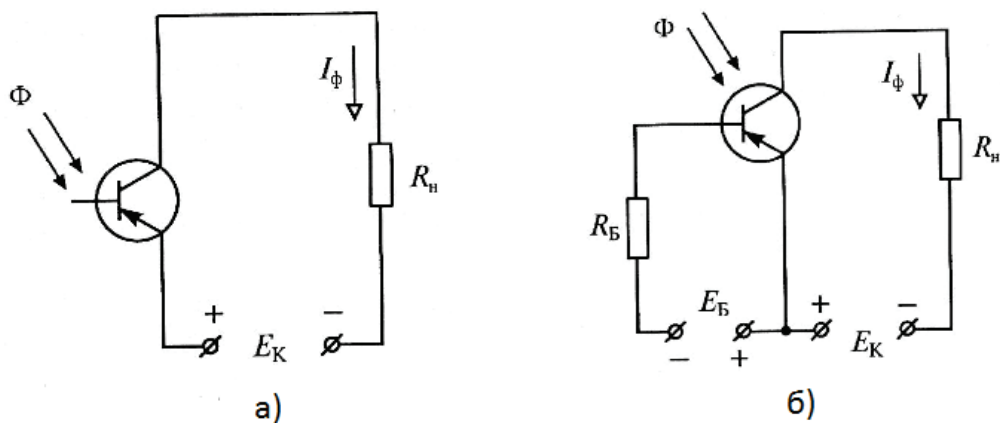


Рисунок 1.4 – Схеми підключення фототранзистора: а) з відключеною базою; б) з підключеною базою [6]

Під дією світла в області бази утворюються пари носіїв зарядів – електрони й дірки.

Дірки (неосновні носії бази) під дією електричного поля джерела E_K рухаються через колекторний перехід, утворюючи фотострум I_Φ , що проходить через навантаження R_H . Електрони, що не пройшли через емітерний перехід, і залишилися в базі, знижують потенційний бар'єр.

Це полегшує перехід дірок з емітера в базу, збільшуючи колекторний фотострум. Чутливість фототранзистора сильно перевищує чутливість фотодіодів і має значення порядку 0,5-1 А/лм [6].

На рис. 1.4, б показана схема з підключеною базою. Можливості такої схеми ширше, тому що на її вхід можна подавати окрім світлового також і електричний сигнал. Звичайно електричний вхід використовують для вибору робочої точки на лінійній ділянці характеристики, а також для зменшення зовнішніх впливів.

Фототранзистори широко застосовуються в різних областях: фототелеграфії, фототелефонії, в обчислювальній техніці, реєстрації видимого, інфрачервоного й ультрафіолетового випромінювання.

Фотовольтаїчні приймачі випромінювання з р-п-переходом. Фотовольтаїчний приймач випромінювання містить р-п-перехід, утворений в домішковому напівпровіднику (рис. 1.5).

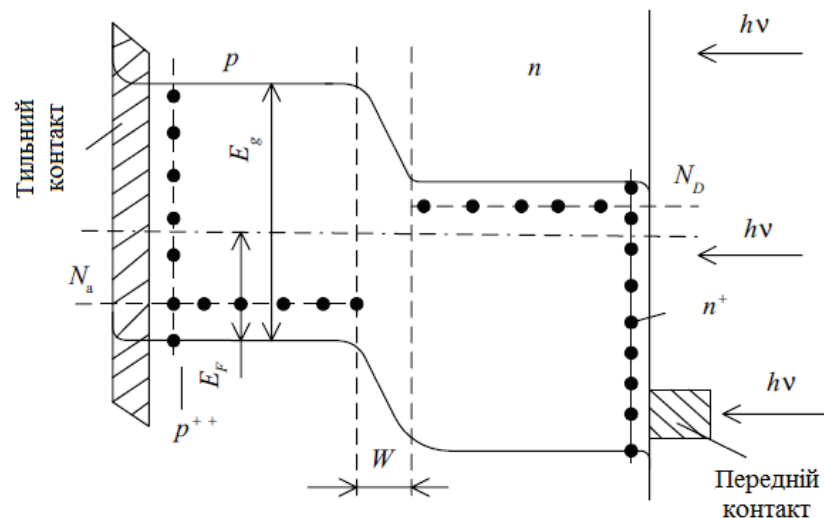


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення р-п-переходу в домішковому напівпровідниковому фотоприймачі, де E_f – рівень Фермі; N_a – концентрація акцепторів; N_D – концентрація донорів; W – зона об'ємного заряду [6]

На рис. 1.5 на р-п-перехід не подано зсуву. При подачі зворотного зсуву енергетична діаграма змінюється, а E_f опиняється нижче в n-зоні. Вольт-

амперна характеристика фотовольтаїчного приймача, екранованого від зовнішнього випромінювання, показана на рис. 1.6 (крива 1).

Падаюче випромінювання зміщує цю криву в положення 2, з'являється фото-ЕРС E_a . З цих графіків ясно, що при експлуатації такого приймача положення робочої точки може обиратися в широкому діапазоні значень напруги зсуву. Якщо обирати в якості робочої точки точку A , то падіння напруги на приймачі відповідає режиму розімкнутого кола. В цьому випадку паралельно з ним можна підключити вольтметр з великим опором і вимірювати на ньому падіння напруги, що відповідає потужності падаючого потоку випромінювання. Якщо навантажити приймач на реєструючий пристрій з малим опором (амперметр), то робочою точкою буде точка B – режим короткого замикання.

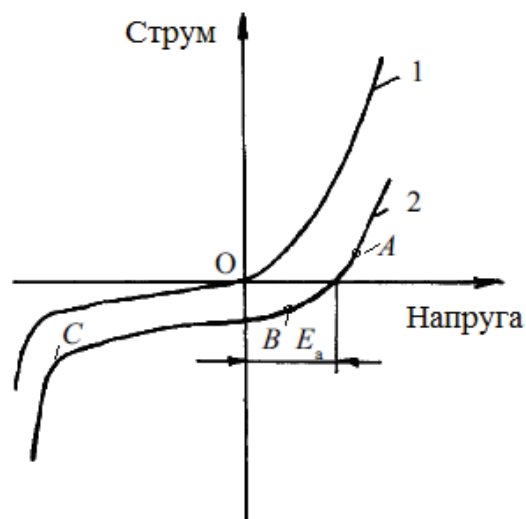


Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика фотовольтаїчного приймача, екранованого від зовнішнього випромінювання, де E_a – фото-ЕРС [6]

Зрештою, на приймач може бути подано зворотне зміщення (точка C). Приймач стає високоомним елементом, і напруга сигналу знімається з опору навантаження, включеного послідовно з приймачем.

Фотовольтаїчні приймачі випромінювання мають максимальну чутливість, коли вони працюють в режимі короткого замикання при нульовій напрузі зсуву (робоча точка B). Фотовольтаїчний приймач є самогенеруючим

пристроєм, який не потребує джерела живлення. Можна показати, що теоретично шуми фотовольтаїчних приймачів нижче шумів фотоопору приблизно на 40%. Це пов'язано з тим, що у фотоопорі генераційно-рекомбінаційний шум створюють носії обох знаків, а у фотовольтаїчних приймачах – лише одного.

1.3. Шумові характеристики ІЧ приймачів

Шуми детекторів. Найважливіший параметр систем технічного бачення – шум (випадкові флуктуації електричного сигналу на виході приймача випромінювання), що впливає на граничні характеристики приймачів (NEP – noise equivalent power – потужність сигналу, за якої цей сигнал можна зареєструвати на фоні шуму, NETD – noise equivalent temperature difference – еквівалентна шуму різниця температур). Шум сигналу від фотоприймача складається з шуму фонового випромінювання, сигнального потоку фотонів та власного шуму приймача, який, в свою чергу, складається з теплового, генераційно-рекомбінаційного, $1/f$ та інших шумів (в залежності від реалізації приймача). Якщо вклад фонового шуму переважає (тобто іншими шумами можна знехтувати), то такий режим роботи приймача називають BLIP (background limited performance). Очевидно, що BLIP режим є оптимальним для будь-якого приймача. Сучасні приймачі вже досягли або наближаються до BLIP режиму (тобто власні шуми приймача максимально мінімізовані), однак слід пам'ятати, що існують фундаментальні обмеження, що не дозволяють нехтувати шумом (наприклад, теплові флуктуації, які існують завжди при $T > 0$).

Якісний приклад аналізу шуму – тепловий шум квантових осциляторів. Процес, за якого квадрат дисперсії рівний середньому значенню, підпорядковується статистиці Пуассона. (Наприклад, статистиці Пуассона підпорядковується процес випромінювання й поглинання (реєстрації) часток, де

кожний акт випромінювання/поглинання являє собою незалежну подію. Прості приведені вище розрахунки цілком корисні при оцінці шумів фону й фотонного шуму. Далі коротко розглядані основні види шумів [7].

Шуми приймачів випромінювання можна розділити на зовнішні (фон) й внутрішні (зумовлені випадковими процесами в самому приймачі).

Шум Джонсона-Найквіста. Випадкові зміни швидкості вільних носіїв заряду приводять до локальних флуктуацій щільності, наслідком чого стає поява локальних мікроскопічних дифузійних струмів. Звідси – резистор зі скінченною T температурою являє собою джерело флуктуацій напруги на його кінцях. Джонсон отримав цей шум експериментально, а Найквіст – вивчив його теоретично. Найквіст отримав вираз для середньоквадратичної напруги шуму на опорі R за смуги пропускання Δf для центральної частоти f :

Дробовий шум. Виникає при проходженні носіїв крізь потенціальні бар'єри (р-п переходи, бар'єри Шоттки і т.д.) через випадкові флуктуаційні швидкості носіїв (внаслідок випадкового характеру процесів розсіювання – рухливість є усередненим параметром). Проходження електронів крізь бар'єр можна вважати випадковим процесом, який не залежить від проходження інших електронів, тому його можна описати статистикою Пуассона.

Генераційно-рекомбінаційний (ГР) шум. Випадковий характер електронних переходів між зонами або між зоною і локальними рівнями приводить до флуктуацій концентрації вільних носіїв заряду, а отже й опору. Даний вид шуму не характерний для металевих провідників (наприклад, болометрів), але проявляється у всіх фотонних напівпровідникових приймачах і при певних умовах може бути домінуючим. Приймаючи до уваги, що число носіїв підпорядковується статистиці Пуассона, спектральна щільність генераційно-рекомбінаційного шуму залежить від температури, оскільки час життя, рухливість і концентрація носіїв залежать від температури. Зазвичай ГР шум вище шуму Джонсона-Найквіста.

Температурний шум. Температурний шум виникає внаслідок флуктуації температури чутливого елемента теплових приймачів випромінювання. З

термодинаміки відома формула для оцінки флуктуацій температури термодинамічної системи [7]:

$$\langle \Delta T^2 \rangle = \frac{kT^2}{C_v}, \quad (1.15)$$

де k – постійна Больцмана, C_v – теплоємність при постійному об'ємі.

Оскільки сучасні приймачі мають вкрай малі розміри, а отже і теплоємність, флуктуації температури можуть досягати десятків мікрокельвінів, що суттєво впливає на граничні характеристики теплових приймачів.

Шум 1/f. Природа шуму 1/f або флікер-шуму достеменно не визначена. Відомо, що на низьких частотах (від частин до сотень герц) в електричних приладах присутній шум, спектральна щільність якого обернено пропорційна частоті. Як правило потужність флікер-шуму може бути суттєво знижена підвищенням якості виготовлення приладу (контакти, поверхні, чистота матеріалу).

Геометричний шум. Геометричний шум виникає в лінійках і матрицях приймачів внаслідок неоднорідних вихідних характеристик каналів. Може спотворювати зображення до повного нерозпізнавання. Для його усунення існують різноманітні процедури корекції зображень, основна ідея яких полягає в нормуванні сигналів від опорних випромінювачів. Для отримання коректних зображень процедура корекції повинна застосовуватися при будь-яких змінах параметрів системи (температури, рівня сигналу, що реєструється, і т.д.) [7].

Вибуховий шум. Вибуховий шум проявляється у вигляді гострого сплеску напруги на вихідних контактах приймачів. Обумовлений ударною іонізацією нейтральних домішок високоенергетичними електронами. Подібно до флікер-шуму залежить від якості технологічних процесів виготовлення приймача.

Фотонний шум. Цей вид шуму обумовлений флуктуаціями потоку фотонів, що падають на приймач, від оточуючого фону й ніяк не залежить від приймача. Числові оцінки фотонного шуму можна отримати з формули Планка для абсолютно чорного тіла й статистики Пуассона реєстрації частинок [7].

2. ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ТА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІЧ- ФОТОПРИЙМАЧІВ

2.1. Тверді розчини CdHgTe

Переваги й недоліки матеріалу CdHgTe. Переважна більшість сучасної оптико-електронної апаратури ІЧ-діапазону спектру створюється з використанням фотоприймачів на основі твердого розчину кадмій-ртуть-телур, незважаючи на технологічну складність і високу ціну даного матеріалу. Основними причинами є унікальні властивості $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [8, 9]:

- КРТ з оптимальними властивостями для реєстрації ІЧ випромінювання в основних вікнах прозорості земної атмосфери може бути отримано простою зміною співвідношення кадмію і ртуті в даному твердому розчині: для діапазону 1-2.5 мкм x обирають близьким до 0.4; для 3-5 мкм – $x \approx 0.3$; для 8-12 мкм – $x \approx 0.2$ (рис. 2.1);
- фотоприймачі на основі КРТ для всіх спектральних діапазонів можуть виготовлятися за єдиною планарною технологією;
- КРТ може бути як n-типу провідності з малою концентрацією носіїв, так і р-типу з високою структурною досконалістю. Це забезпечує можливість створення як високоефективних фоторезисторів для діапазону до 15 і більше мкм, так і фотодіодів з високою швидкістю;
- на основі КРТ можна створювати транзистори [10];
- КРТ можна вирощувати як у вигляді монокристалів, так і у вигляді тонких епітаксціальних шарів на прозорих в необхідній області спектру підкладках, що забезпечує можливість створення великоформатних діодних фоточутливих матриць;
- фотоприймачі на основі КРТ мають набагато більшу стійкість до проникаючого випромінювання за рахунок більшої дефектності структури, ніж

прилади на основі антимоніду індію, кремнію та інших напівпровідникових матеріалів.

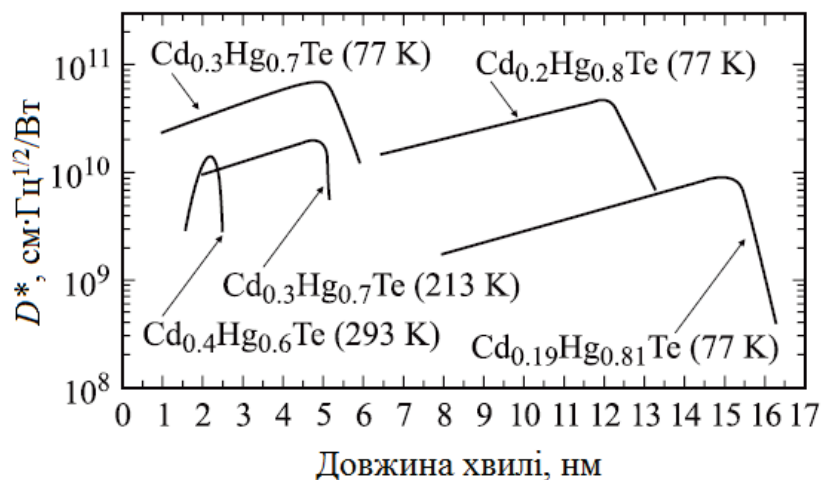


Рисунок 2.1 – Спектральні залежності детектуючої здатності фотоприймачів на основі сполуки CdHgTe [11]

Методи синтезу CdHgTe.

Метод рідиннофазної епітаксії. Основні переваги даного методу: відносно низька вартість та висока продуктивність обладнання, автоматична очистка поверхні на початковому етапі вирощування, додаткова очистка від домішок у процесі росту та однорідність складу по площі. Найбільш технологічним, як показав аналіз фазових рівнів у системі CdHgTe [19], є нарощування епітаксіальних шарів з розчину-розплаву на основі телуру. В цьому випадку суттєво знижується температура епітаксії та, відповідно, парціальний тиск ртуті за $T = 500-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 0.15 атм. У той час як за використання ртуті як розчинника тиск її парів навіть за $T = 350-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ вже досягає 1 атм. Після дослідження багатьох варіантів було обрано варіант технології вирощування шарів в замкненому об'ємі з кінцевим етапом видалення рідкої фази з поверхні вирощеного шару методом центрифугування [19].

Найбільшою проблемою епітаксії є правильний вибір підкладки епітаксіального шару, оскільки її властивості багато в чому визначають параметри й структурну досконалість вирощених шарів. В якості підкладок

можуть використовуватись моно атомні напівпровідники (кремній) або бінарні сполуки (галій-арсенід) та інші матеріали, але необхідна наявність перехідного прошарку між підкладкою та шаром КРТ для кращого узгодження параметрів кристалічних решіток. Найкращі результати отримано із застосуванням в якості підкладки твердого розчину CdZnTe . Технологія його вирощування досить складна через низьку теплопровідність, високу пружність парів компонентів, схильності до утворення двійників та інших факторів. Розроблений на сьогодні метод вирощування монокристалів CdZnTe [21] ґрунтується на модернізованій технології виготовлення кристалів КРТ методом вертикальної або горизонтальної кристалізації розплаву за температур $1120-1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ з подальшим охолодженням зі швидкістю не більше $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Ця технологія забезпечує отримання монокристалічних, прозорих в ІЧ-області підкладок з діаметром більше 30 мм, щільністю дислокацій не вище $(5-8)\cdot 10^4\text{ см}^{-2}$ за відсутності малокутових меж та включень іншої фази [20].

Вирощування гетероструктур CdHgTe/Si методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ). Вирощування гетероепітаксialьних структур $\text{CdHgTe}/\text{Si}(310)$ здійснюється у багатокамерній високовакуумній установці МПЕ. Для контролю процесів передепітаксialьної підготовки й вирощування використовуються дифракція швидких електронів та однохвильова еліпсометрія. В якості підкладок використовують кремнієві пластини діаметром 76 і 100 мм, орієнтовані за площиною (310).

Перед завантаженням у вакуумну систему кремнієві підкладки пасивують тонким діоксидом кремнію. На останньому етапі хімічної обробки підкладки занурюють у 1% розчин плавикової кислоти для видалення діоксиду кремнію й гідрогенізації поверхні [22]. Завантаження підкладок в установку проводиться із герметичного боксу в атмосферу сухого азоту.

Передепітаксialьний відпал у вакуумі проводиться у два етапи. Попереднє прогрівання проводиться для видалення фізично адсорбованих забруднень. Потім зразок нагрівають до температури $550-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в потоці

арсену. Після експозиції в парах арсену протягом 15-и хвилин і охолодження кремнієва підкладка передається в камеру вирощування буферних шарів.

Неузгодженість кремнієвої підкладки із КРТ складає близько 19%, яке знімається введенням проміжних шарів ZnTe і CdTe. Шар ZnTe товщиною 0,01 мкм вирощується на кремнію при 200-250 °С за щільності потоку атомів Zn у 20-40 разів більше щільності потоку молекул Te₂. Шар CdTe товщиною 6-8 мкм вирощується на ZnTe/Si за температури 280-320 °С, при чому щільність потоку атомів Cd в 3-5 разів перевищує щільність потоку молекул Te₂.

На отриманій підкладці (310)CdTe/ZnTe/Si вирощують шари КРТ за розробленою технологією, деталі якої приведено в [23].

Параметри фотоприймачів на основі CdHgTe.

Фотодіоди. Фотодіоди на основі КРТ р-типу провідності з концентрацією дірок порядку 10^{16} см^{-3} створюються легуванням іонами бору з енергією близько 160 кеВ або обробкою в плазмі аргону з енергією йонів порядку декількох сотень еВ [9]. В другому випадку йони аргону розплавляють в місці падіння мікрообласті КРТ, що призводить до різкого зростання локальної концентрації вільних атомів ртуті, швидко дифундуючих по міжвузлях у глибину кристалу та компенсуючих наявні вакансії. При швидкому охолодженні виниклий надлишок міжвузлової ртуті призводить до інверсії типу провідності [12].

Електрони в КРТ за температури рідкого азоту мають високу рухливість порядку $(3-5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, тому довжина дифузійного зміщення може сягати декількох сотень мікрон. В діодах проходження прямого струму супроводжується переносом інжектованих з р-n-переходу неосновних носіїв на досить великі відстані. Вони породжуються в p^+ -області з поглинанням енергії, дещо більшої від ширини забороненої зони, яку потім віддають при рекомбінації біля іншого контакту. Відбувається охолодження p^+ -області та нагрівання області другого контакту – інжекційне перенесення тепла [11]. Експериментально цей ефект було відкрито і досліджено у 1974 р. [13], при

цьому було досягнуто додаткове охолодження нижче температури рідкого азоту до 5 К.

Діоди створюються також і з використанням бар'єрів Шотткі. Для покращення якості межі поділу між металом і напівпровідником наноситься тунельно-прозорий шар діелектрика Al_2O_3 товщиною у 3-5 нм. В такій структурі [11] щільність поверхневих станів поблизу середини забороненої зони складає $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$, щільність повільних поверхневих станів близько 10^{10} см^{-2} , щільність позитивно вбудованого заряду близько $(3-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Фотодіоди в матричних і малоелементних фотоприймальних пристроях мають розміри р-n-переходів від 15×15 до 300×300 мкм, а в одноелементних приймачах випромінювання до 2×2 мм і більше. Ефективні розміри фоточутливих майданчиків більше розмірів р-n-переходів, оскільки створені освітленням носії збираються р-n-переходом з навколишньої області в межах довжини дифузійного зміщення або відстані до другого контакту. На рис. 2.2 показано типовий розподіл фоточутливості діода. За розмірів р-n-переходу близько 20 мкм реальний розмір фоточутливого майданчика за рівнем 0.5 складає 35-40 мкм [11].

Питома детектуюча здатність D^* і струмова фоточутливість S_i дещо більше, а обернені струми менше у фотодіодів, які виготовлено в шарах КРТ, вирощених методом рідкофазної епітаксії, ніж у фотодіодів, виготовлених в шарах, отриманих іншими методами епітаксії [14].

Спектральні залежності детектуючої здатності фотоприймачів на основі сполуки CdHgTe представлені на рис. 2.1. Вольт-амперну характеристику фотодіода, виготовленого на об'ємних монокристалах КРТ, представлено на рис. 2.3. В режимі прямого детектування швидкодія фотодіодів досягає декількох десятків МГц, у гетеродинному режимі – до 1 ГГц.

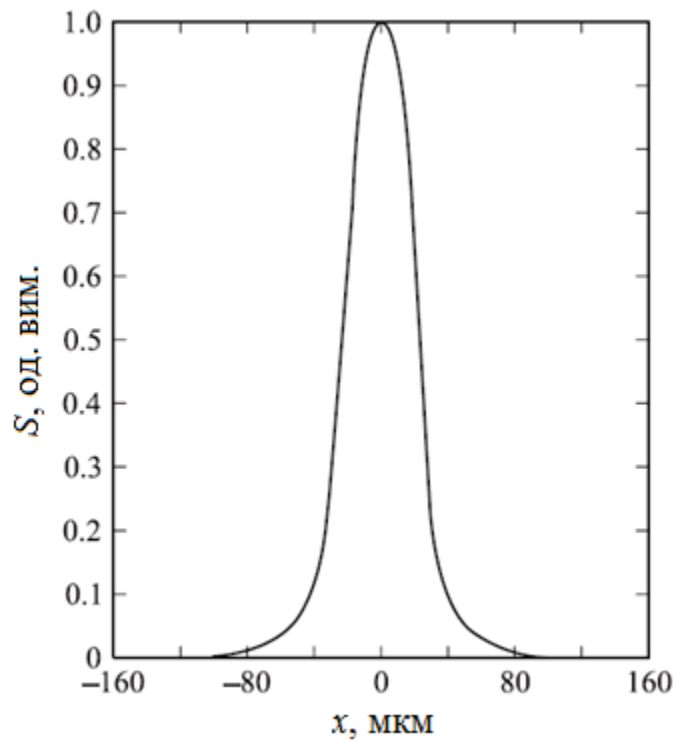


Рисунок 2.2 – Розподіл фоточутливості фотодіода на основі КРТ [11]

Потужність сигналу, еквівалентна потужності шуму NEP на довжині хвилі 10.6 мкм за температури рідкого азоту, краще за значення 10^{-19} Вт/Гц [9]. Частотні характеристики фотодіодів у гетеродинному режимі представлено на рис. 2.4.

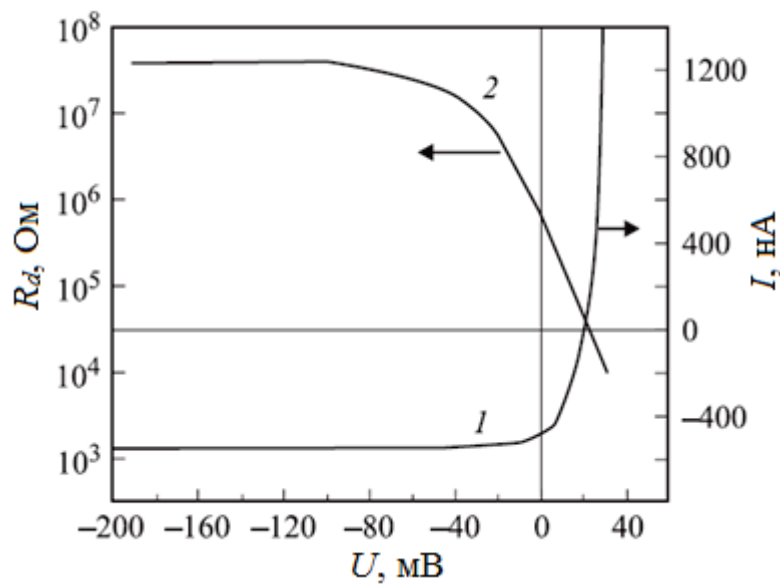


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика фотодіода, виготовленого на об'ємних монокристалах КРТ (1) та його диференційний опір R_d (2) [9]

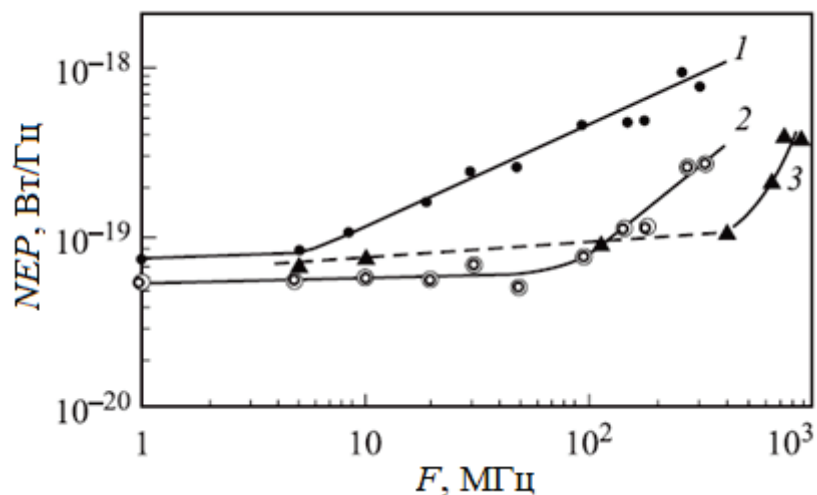


Рисунок 2.4 – Частотні характеристики фотодіодів в гетеродинному режимі. Потужність гетеродинного випромінювання P_b , мВт: (1,2) – 0.5, (3) – 1; струм фотодіода I , мА: (1) – 0.5, (2) – 5, (3) – 10 [11]

Існуючі уявлення щодо нестабільності КРТ та фотоприймачів на його основі пов'язані здебільшого з нестабільністю поверхні через погану її підготовку й захист. Розроблені в [11] методи попередньої обробки поверхні КРТ і технологія нанесення захисного діелектричного покриття забезпечили створення високостабільних та стійких до дії підвищеної температури фотодіодів. Довготривале (до 10 років) зберігання за температур аж до 80 °С не призводить до погіршення параметрів фотодіодів. Допустима температура довготривалого зберігання фотодіодів досягає +70 °С [15].

Властивості фотодіодів на основі гетероструктур CdHgTe/Si. На рис. 2.5 (зверху) приведено залежність темного струму I_d при зміщенні 100 мВ від оберненої температури для діода, виготовленого із структури складу $x = 0.328$. В області температур 160-300 К простежується пропорційна n_i^2 зміна темного струму, яка визначається дифузійним механізмом протікання струму [24]. В області температур 140-160 К темновий струм є пропорційним n_i , що обумовлено процесами генерації-рекомбінації в області збіднення.

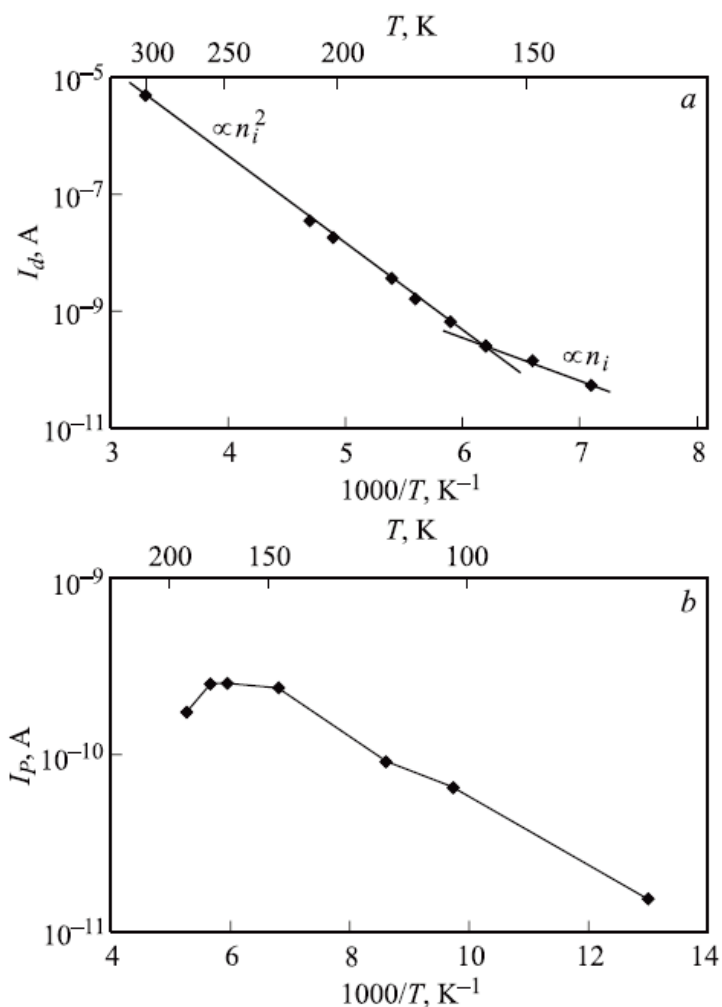


Рисунок 2.5 – Залежність темнового струму (зверху) та фотоструму (знизу) при зміщенні 100 мВ від оберненої температури для фотодіодів, виготовлених з КРТ, вирощеного методом МПЕ з мольною часткою CdTe $x = 0.328$ [25]

Фотострум I_p (рис. 2.5, знизу) має максимум в діапазоні температур 160-180 К. За температур до 160 К фотострум збільшується зі збільшенням температури, що узгоджується з теоретичними даними. Згідно з [24], довжина дифузії неосновних носіїв заряду в фотодіодах на основі КРТ із складом $x = 0.31$ безперервно збільшується в діапазоні температур від 50 до 210 К за рахунок збільшення часу життя, а фотострум є пропорційним довжині дифузії.

Пояснити наявність максимуму фотоструму за температури 150-180 К можна ефектом зміни ширини забороненої зони при зміні температури, що призводить до зсуву краю поглинання в короткохвильову область. При

збільшенні температури від 77 до 200 К довгохвильова межа фоточутливості зменшується від 4.3 до 4 мкм. При цьому фотострум зменшується в два рази. Збільшення довжини дифузії виявляється недостатнім для компенсації зменшення фотоструму, що й веде до появи максимуму при 160-180 К на кривій залежності фотоструму від температури.

Порівнюючи графіки темного струму і фотоструму можна знайти температуру рівності темного струму й фотоструму, яка складає близько 170 К. Таким чином, за температур вище 170 К режим обмеження фоном виконуватись не буде.

Для характеристики фотодіодів часто використовують добуток диференційного опору за нульового зміщення R_0 та його оптичної площі A . Значення R_0 визначається безпосередньо з виміряних ВАХ. Для оцінки A використовують залежність фотоструму від щільності потоку фотонів і площі збирання фотогенерованих носіїв заряду [25]:

$$I_p = \eta q Q(\theta) A, \quad (2.1)$$

де η – квантова ефективність (кількість електронно-діркових пар, що генеруються поглиненим фотоном), q – заряд електрона, A – площа збирання фотогенерованих носіїв заряду, $Q(\theta)$ – щільність потоку фотонів.

Виходячи з цього можна визначити площу збирання фотогенерованих носіїв заряду, яка лежить в діапазоні 100-200 мкм². Оскільки фізично дана площа представляє собою смугу навколо індієвого контакту (сам контакт вважається непрозорим), то, додавши до отриманого значення площу індієвого стовпа (індієвий контакт вважається круглим з радіусом 10 мкм), отримаємо оптичну площу р-п-переходу A . Помноживши A на значення диференційного опору за нульового зміщення R_0 , отримаємо значення $R_0 A$.

Ще одним важливим параметром як самого діоду, так і матеріалу, з якого його виготовлено, є довжина дифузії носіїв заряду. Вважаючи, що геометрично

p-n-перехід представляє собою коло, можна визначити довжину дифузії носіїв заряду. При цьому необхідно брати до уваги, що геометричний розмір p-n-переходу перевищує розмір вікна легування за рахунок дифузії ртуті на 2-3 мкм [26].

Матричні фотоприймальні пристрої. Гарна просторова роздільна здатність інфрачервоних тепловізійних систем визначається кількістю пікселів ІЧ-фотоприймача, збільшення якої веде до збільшення геометричних розмірів фотоприймача. Для реалізації подібних ІЧ-фотоприймачів на основі твердих розчинів телуриду ртуті і кадмію є необхідним фоточутливий матеріал з високою однорідністю складу. Останнім часом значні сили прикладаються до розробки процесів вирощування гетероепітаксialьних структур КРТ методом молекулярно-променевої епітаксії на кремнієвих підкладках великого діаметру [27].

Матричні ІЧ-фотоприймачі виготовляють методом гібридного елементного збирання матриці фоточутливих елементів на основі КРТ і кремнієвого мультиплексора за допомогою індієвих стовпів. Для охолоджуваних ІЧ-фотоприймачів може виникнути проблема руйнування гібридної структури через різницю коефіцієнтів термічного розширення фото чутливих елементів та кремнієвого мультиплексора. Відповідно чим більший формат ІЧ-фотоприймача, тим більший геометричний розмір приладу і тим сильніше проявляються ефекти, пов'язані з відмінністю в КРТ. Застосування гетероепітаксialьних структур КРТ, вирощених МПЕ, на підкладках кремнію дозволяє вирішувати проблему довговічності гібридного ІЧ-фотоприймача при його охолодженні від кімнатної до криогенних температур.

Вибір орієнтації підкладки при вирощування КРТ методом МПЕ визначається низьким коефіцієнтом вбудовування атомів ртуті у кристалічну ґратку та, як наслідок, високим тиском парів ртуті під час вирощування. Було встановлено, що на поверхні (111) епітаксialьне нарощування КРТ є можливим при найбільш низьких тисках парів ртуті [28]. Однак площа (111) в КРТ є двійниковою площиною, що веде до низької структурної досконалості шарів

CdHgTe(111) внаслідок утворення великої кількості двійників та дефектів пакування. В 1988 р. Костнер і Шаакі встановили [29], що на поверхні (112) нарощування КРТ є можливим за низького тиску парів ртуті без інтенсивного утворення двійників, що і визначило цю орієнтацію як базову для розвитку процесів вирощування різних структур КРТ на різних підкладках для ІЧ-фотоперетворювачів. Проте орієнтація (112) є чутливою до незначних змін умов вирощування, що визначає вузький інтервал оптимальних умов для вирощування КРТ із мінімальною щільністю дефектів [30]. Тим не менш проводяться інтенсивні дослідження й розробка обладнання для вирощування гетероепітакіальних структур КРТ методом МПЕ на кремнієвих підкладках з орієнтацією (112) більшого діаметру. Встановлено, що можливим є використання таких структур у високоякісних ІЧ-фотоприймачах в спектральному діапазоні до 10 мкм [31].

Матричні фотоприймальні пристрої (МФПП) на основі КРТ найбільш повно забезпечують виконання вимог, що висуваються сучасній тепловізійній апаратурі щодо кардинального зменшення ваго-габаритних характеристик, збільшенню дальності бачення та ін. Двовимірні матричні фотоприймальні пристрої (focal plane array – FPA) мають формат $M \times N$ елементів, де M та N – кількості елементів в рядках та стовпцях відповідно. На даний момент розроблено фотоприймальні пристрої двох типів: слідкуючі та багаторядні [11].

МФПП слідкуючого типу (staring focal plane array – SFPA) містять десятки та сотні тисяч елементів, причому зазвичай $N \leq M$. Системи для ІЧ діапазону з використанням слідкуючих МФПП для отримання теплового зображення об'єктів не потребують оптико-механічного сканування, що суттєво спрощує й здешевлює тепловізійний прилад.

На даний момент розроблено МФПП слідкуючого типу у форматах 32x32, 128x128 та 384x288 елементів [14, 16] на спектральні діапазони 3-5 та 8-12 мкм. На рис. 2.6 показано структуру фоточутливого елемента на прикладі елемента матричного фотоприймального пристрою з форматом 384x288 та з кроком елементів 28 мкм. Падаюче випромінювання потрапляє через прозору і

просвітлену в необхідному спектральному діапазоні спектру підкладки епітаксiального шару та надходить в активний фоточутливий шар КРТ. Матриця фоточутливих елементів з'єднується за допомогою індієвих мікроконтактів з кремнієвою мікросхемою мультиплексора. Гібридизована таким чином збірка приклеюється зі сторони кремнієвої мікросхеми на поверхню несучої сапфірової підкладки. На контактні майданчики підкладки наносять виводи для зчитування фотосигналів, подачі живлення та сигналів управління. На цю ж підкладку встановлюються термодатчики та закріплюється охолоджувана діафрагма. Отриманий фотоприймальний вузол монтується на місце вакуумного корпусу. Тепловиділення вузла не перевищує 60 мВт. Повна кількість сигнальних, управляючих і допоміжних виводів сягає 24. Фотосигнали виводяться двома каналами.

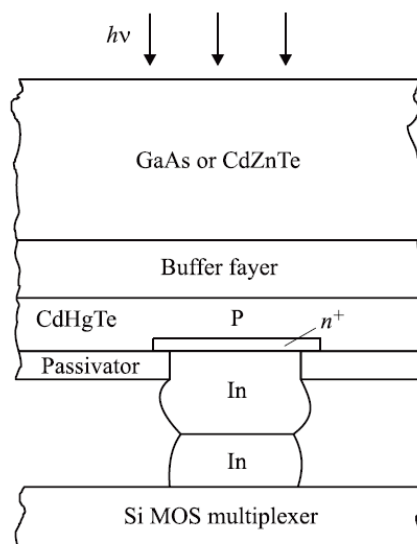


Рисунок 2.6 – Приклад структури фоточутливого елемента сліdkуючого типу [11]

В МФПП, виготовлених на основі шарів КРТ, що вирощені методом рідиннофазної епітаксії, питома детектуюча здатність D^* та вольтова фоточутливість S_V дещо вища, ніж в МФПП, виготовлених на основі шарів, як було отримано іншими методами епітаксії. Проте однорідність характеристик МФПП вища у випадку використання шарів, отриманих методом МПЕ.

Багаторядні МФПП мають формати 4x28, 2x96, 2x256 та 4x288 елементів [17], та розроблені для спектрального діапазону 8-12 мкм. В режимі часової затримки та накопичення по чотирьом елементам використовують формати 4x48 та 4x128 (регулярне розташування фотодіодів), по двом елементам – формати 2x96 та 2x256 (шахове розташування).

Багаторядні МФПП призначені для систем, в яких використовується часова затримка й накопичення фотосигналів (режим ЧЗН). Суть режиму ЧЗН полягає в сумуванні (накопиченні) сигналів з усіх M елементів кожного рядка, причому затримка зчитування сигналів, що додаються з кожного елемента рядка, узгоджена зі швидкістю сканування зображення уздовж цього рядка. Ускладнення тепловізійної системи внаслідок введення оптико-механічного пристрою розгортання окупається збільшенням відношення сигнал/шум у $M^{1/2}$ разів. Окрім того, M -кратне резервування збільшує часову стабільність та надійність МФПП.

МФПП містить матрицю фоточутливих елементів з КРТ та кремнієві мікросхеми зчитування і попередньої обробки фотосигналів, що розміщуються у фокальній площині вакуумованого корпусу, який забезпечує захист і стикування із системою охолодження до необхідної робочої температури.

Матриці фоточутливих елементів виготовляють на основі епітаксіальних шарів КРТ р-типу провідності з концентрацією дірок близько 10^{16} см^{-3} , шляхом формування в них матриць фотодіодів за груповою планарною технологією. Застосовують епітаксіальні шари, що вирощують різними методами: рідиннофазною епітаксією товщиною близько 15 мкм на підкладці CdZnTe, молекулярно-променевою епітаксією товщиною 7-10 мкм на підкладці GaAs з підшаром CdZnTe або епітаксією з металоорганічних сполук товщиною 10-12 мкм на підкладці GaAs з підшаром CdZnTe [11].

Поверхня КРТ захищається шаром діелектрика. У вікнах захисного пасивуючого шару формуються р-п-переходи, а омичні контакти до загального для всіх діодів р-шару створюються на вільних від р-п-переходів периферійних областях епітаксіального шару. До п-областей діодів приєднують індіїві

стовпчасті мікроконтакти з розміром основи біля 20х20 мкм та висотою близько 12 мкм. Вони забезпечують стикування з аналогічними мікроконтактами на підкладці з сапфіру або на кристалі кремнієвої мікросхеми мультиплексора. Механічне та електричне стикування проводиться методом холодного компресійного зварювання індієвих мікроконтактів (flip-chip). Поєднання багатьох тисяч індієвих мікроконтактів кристалу матриці фотодіодів та кремнієвого кристалу мікросхеми здійснюється з використанням спеціального інфрачервоного мікроскопа з візуалізацією мікроконтактів, що поєднуються, крізь кремнієвий кристал мікросхеми.

Одним із найважливіших параметрів матричних фотоприймальних пристроїв є величина міжелементного взаємозв'язку. Сильний взаємозв'язок може привести до суттєвого розмивання тепловізійного зображення. Розрізняють три типи взаємозв'язку: оптичний, електричний та фотоелектричний. Оптичний взаємозв'язок визначається якістю оптичного тракту тепловізійного пристрою. Фотоелектричний пов'язаний з дифузією фото-генерованих носіїв в загальному напівпровідниковому шарі матриці фотодіодів. Електричний взаємозв'язок визначається падінням напруги при протіканні струму від р-п-переходів до неактивних контактів, а також взаємозв'язком між вхідними каналами охолоджуваної мікросхеми.

Для контролю взаємозв'язку між елементами в робочому режимі МФПП пляма оптичного зонду або смуга ІЧ випромінювання, що формується оптичною щілиною, фокусується на один з елементів матриці та вимірюється сигнал елементів, які розташовано поруч. При переміщенні оптичного зонду вздовж освітлюваного елемента за залежністю фотосигналу від координати оптичного зонду визначається ефективний розмір фоточутливого майданчика (рис. 2.3). Ширина оптичного зонду в області довжин хвиль 2-14 мкм за рівнем 0.5 складає близько 15 мкм, а мінімальний крок переміщення – 3 мкм. Величина взаємозв'язку в МФПП за розмірів р-п-переходів елементів близько 20х20 мкм та з кроком 35 мкм, визначена шляхом відповідної обробки фотосигналу, міститься в межах 5% [18]. Наявність на поверхні КРТ паразитного при

поверхневого шару оберненого типу провідності може призводити до збільшення електричного взаємозв'язку.

2.2. Тверді розчини PbSnTe та InSb

Синтез твердих розчинів PbSnTe та особливості матеріалу. Телурид свинцю та сполуки на основі PbTe класифікують як промислові термоелектричні матеріали, що знаходять використання у діапазоні 500-700 К [37]. Наразі більшість досліджень цього матеріалу мають за мету знаходження можливостей покращення його експлуатаційних характеристик, серед яких, в першу чергу, варто виділити коефіцієнт потужності $\alpha^2\sigma$ та термоелектричну добротність Z , яка визначається за формулою [36]:

$$Z = \alpha^2\sigma/\chi, \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт термо-ЕРС, σ – питома електропровідність, χ – теплопровідність.

Як видно з рівності коефіцієнти α , σ , та χ пов'язані між собою фізичною природою матеріалу: збільшення α зумовлює зменшення σ та зростання χ через зниження концентрації заряду [37]. У зв'язку з цим є необхідним знаходження компромісних матеріалів, які б забезпечували значне зменшення фононної складової кристалу за його незмінної електронної системи. Перспективними шляхами досягнення даної цілі вбачають легування матеріалу й утворення його твердих розчинів [38]. Окрім того, є важливими технологічні деталі, що визначають структурні характеристики синтезованого матеріалу, які можуть мати суттєвий вплив на його термоелектричні параметри. Останні доводиться визначати у кожному випадку окремо.

Сучасні термоелектричні перетворювачі мають ККД близько 5-8 % [37]. Для досягнення максимального ККД пристрою необхідно робити оптимізацію характеристик матеріалу, що, як правило, проводять для кожного типу

матеріалу термоелемента окремо. Надійні матеріали n-типу провідності отримують шляхом легування телуриду свинцю елементами групи V, зокрема PbTe:Bi та PbTe:Sb. Ефективний p-PbTe отримують легуванням натрієм, що приводить до значного погіршення механічних властивостей й поступового зменшення термоелектричної потужності і, як наслідок, до зменшення часу експлуатації матеріалу. Тому для даних цілей доцільним є використання твердих розчинів PbSnTe, які при високих концентраціях олова мають широку область гомогенності, що зміщена в сторону халькогену та визначає діркову провідність матеріалу [36].

Синтез матеріалу проводиться у вакуумованих кварцових ампулах, які попередньо промиваються сумішшю азотної та хлористої кислот протягом 2-х годин та кілька разів по чергово спиртом й деіонізованою водою. Тиск в заповнених відповідними компонентами ампулах зменшують до $2 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст., витримують півгодини та запаюють. Далі ампулу нагрівають в муфельній печі до температури 970 K та витримують три години, після чого нагрівають до 1290 K та витримують ще одну годину. Охолодження синтезованого в ампулах матеріалу проводиться на повітрі. Отриманий матеріал подрібнюють в ступці та, після виділення фракції розміром 0.05-0.5 мм, піддають тиску 0.5-1 ГПа. В результаті отримують зразки циліндричної форми діаметром 5 мм та довжиною близько 5-10 мм. Отримані зразки відпалюють за температури 800 K [36].

Властивості та методи отримання матеріалу InSb. На сьогоднішній день антимонід індію (InSb) є добре дослідженим напівпровідниковим матеріалом типу $A^{III}B^V$, технологія отримання монокристалів якого досягла високої досконалості. Концентрація електрично активних домішок в чистих зразках не перевищує $(1-2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [39].

Електрони провідності в n-InSb мають виключно малу ефективну масу, що визначає велику рухливість вільних електронів та малу енергію іонізації домішок. Такі параметри матеріалу, по-перше, визначають високу чутливість n-InSb до короткохвильового електромагнітного випромінювання та, по-друге,

дають унікальні можливості для вивчення впливу зовнішніх умов на електронні процеси. Вплив зміни температури, електричного і магнітного полів, електромагнітного випромінювання та інших параметрів призводить до суттєвим, а іноді й радикальним змінам його властивостей. Це, з одного боку, становить самостійний фізичний та практичний інтерес, а з іншого – дозволяє моделювати цілий ряд явищ, що властиві іншим напівпровідникам та електронним системам. Так, наприклад, через великий боровський радіус електрона на донорі (640 ангстрем) в n-InSb при концентраціях, на 3-4 порядки менших, ніж в кремнії та германії, стає можливим вивчення проблеми взаємодії між домішками та процесами де локалізації домішкових станів [39].

Великі досконалі кристали InSb можна вирощувати шляхом затвердіння розплаву за методом Чохральського в атмосфері інертного газу (Ar, N₂, He) або водню за зниженого тиску (приблизно 50 кПа). Також можливе отримання плівок матеріалу шляхом рідиннофазної епітаксії, епітаксії за методом гарячої стінки, молекулярно-променевої епітаксії. Ще одним методом вирощування кристалів InSb є вирощування при розкладанні металоорганічних сполук індію та стибію методом металоорганічного осадження з пару.

Синтез антимоніду індію відбувається шляхом сплавлення індію з сурмою в кварцовому контейнері у вакуумі (близько 0.1 Па) за температури 800-850 °С в атмосфері водню [39].

Фотоприймачі на основі матеріалів PbSnTe та InSb. Структури PbSnTe/PbTeSe, що вирощуються методом рідиннофазної епітаксії, використовуються для створення ІЧ фотодіодів, чутливих в інтервалі довжин хвиль 8-14 мкм [32]. Детектуюча здатність фотодіода залежить від параметра R_0A , який, в свою чергу, визначається домінуючим механізмом струмоперенесення в р-n-переході за малих зміщень.

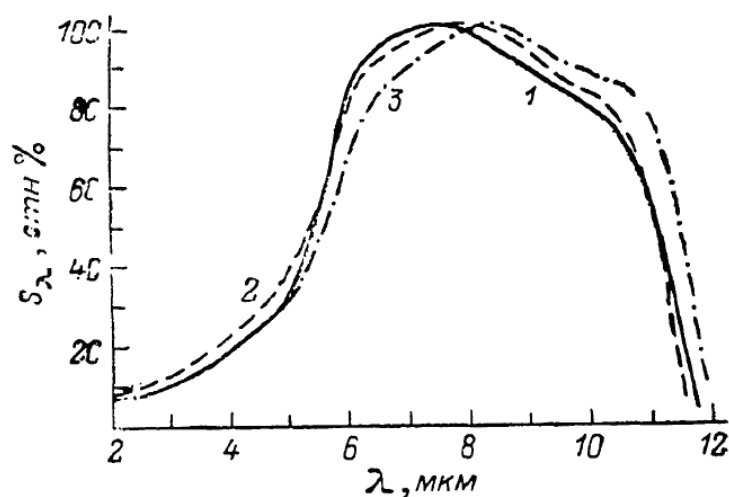


Рисунок 2.7 – Спектральні характеристики структури PbSnTe/PbTeSe для різних зразків [32]

Спектральні характеристики відносної чутливості фотоприймачів на основі PbSnTe мають вигляд, близький до зображеного на рис. 2.7. Максимум відповідає довжинам хвиль 7.5-8.5 мкм. Різкий спад в області 5.5-6 мкм відповідає власному поглинанню широкозонного вікна PbTeSe. В довгохвильовій області 9-12 мкм чутливість плавно знижується і на довжинах хвиль 10-10.5 мкм складає 70-85% від максимальної. Інтервал довжин хвиль фотовідгуку та форма спектральної характеристики дозволяють припустити, що в даних структурах р-п-перехід розташований у варізонній області. Наявність такої області може бути обумовлена дифузійними процесами, що протікають коло металургічної гетеромежі при епітаксимальному нарощуванні шару PbTeSe. Покладаючи ефективні коефіцієнти дифузії селена і олова близькими до $5 \cdot 10^{-11}$ см²/с [33], а час росту 10^3 с, отримуємо протяжність області змінного складу (твердого розчину PbSnTeSe) близько 2-3 мкм.

Типові прямі гілки ВАХ елементів на основі структури PbSnTe/PbTeSe приведено на рис. 2.8 у напівлогарифмічному масштабі. При прямих зміщеннях $2kT/q \leq V \leq 0.1$ В ВАХ всіх діодних елементів простежуються залежності $J \sim \exp[qV/\beta kT]$, де J – густина струму, V – прикладена напруга, q – одиничний електричний заряд. Значення коефіцієнта β знаходиться в межах 1.6-1.95, що свідчить про переважання рекомбінаційного струму [34]. За напруг, більших від

0.1 В, струм починає визначатися опором об'ємних областей структури, контактів та підвідних провідників в більшій мірі, ніж електронними процесами в р-п-переході.

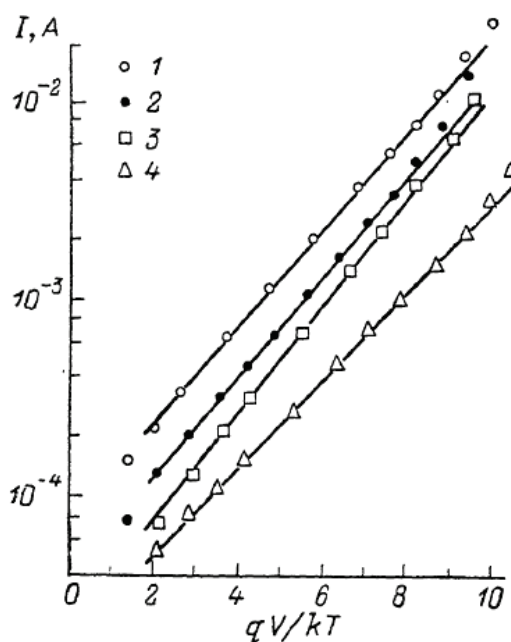


Рисунок 2.9 – Прямі гілки ВАХ різних зразків діодів на основі структури PbSnTe/PbTeSe [32]

Обернені гілки ВАХ елементів при зміщеннях $|V| > 0.03$ В близькі до степеневої залежності виду $J \sim |V_k - V|^m$, де $m = 2.6-2.8$ [34]. Це свідчить, що обернений струм структури не визначається генерацією носіїв в ОПЗ.

Для прикладу і порівняння на рис. 2.10 приведено прямі гілки ВАХ фотодіодних структур на основі InSb, виміряні за трьох температур.

За температури 78 К в р-п-переходах спостерігається три механізму струму. За $U < 7k_0T/q$ спостерігається залежність $I = I_d \exp(qU/\gamma k_0T)$, де $\gamma = 1.1$, $I_d = 4 \cdot 10^{-7}$ А/см², що характерно для дифузійного струму. За значень $7k_0T/q < U < 20k_0T/q$ вигляд ВАХ відповідає залежності $I = I_0 \exp(qU/\beta k_0T)$, де $\beta = 2.3$, $I_0 = 1.5 \cdot 10^{-4}$ А/см², тобто поряд із дифузійною має місце і рекомбінаційна складова струму. За $U > 30k_0T/q$ настає режим високої інжекції, опір області просторового заряду стає порівняним з опором товщини напівпровідника, дифузійний процес розвивається глибше в базу і ВАХ описується залежністю виду $I = I_c \exp(qU/ck_0T)$ [35].

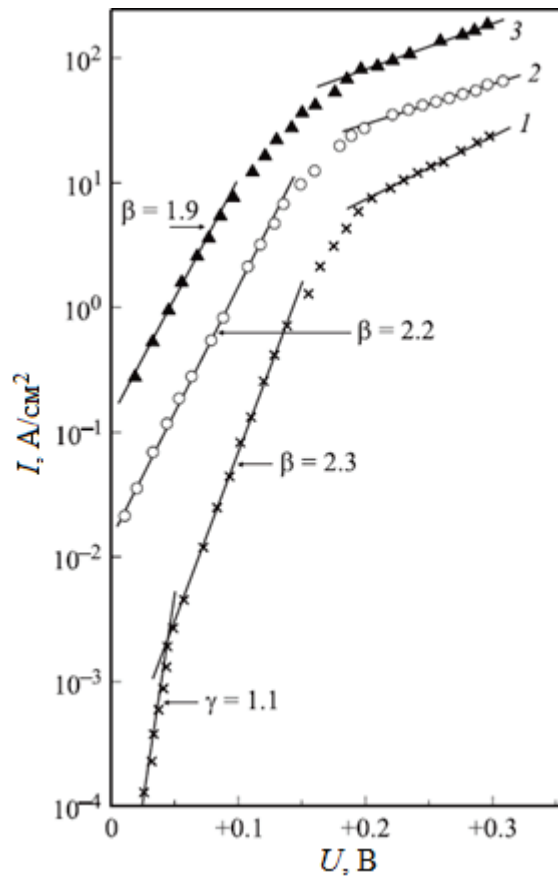


Рисунок 2.10 – ВАХ р-n-переходів фотодіода на основі структури InSb за прямого зміщення для температур T , К: 1 – 78, 2 – 115, 3 – 145 [35]

Зі збільшенням температури при $T > 110$ К зникає характерна ділянка дифузійного механізму, величина β падає з 2.3 за $T = 78$ К до 1.9 за $T = 145$ К, тобто за таких температур в усьому діапазоні прямих зміщень (до режиму високої інжекції) струм р-n-переходів на InSb складається з двох складових – дифузійної та рекомбінаційної.

3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОХОЛОДЖУВАНОВОГО ІЧ-ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ CdHgTe/Si

3.1. Синтез, структура та хімічний склад плівок CdHgTe та гетероструктур на їх основі

Зразки гетероструктур на основі КРТ (рис. 3.1) були вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії (див. підрозділ 2.1) з проміжним CdTe/ZnTe буферним шаром на кремнієвій підкладці з [310]-орієнтацією.

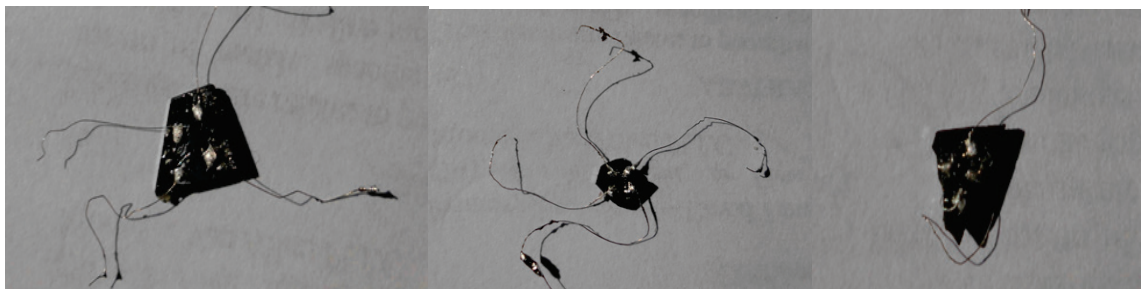


Рисунок 3.1 – Зображення отриманих зразків з нанесеними контактами

Шари $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (товщиною $d = 5-10$ мкм) були вирощені зі збільшенням складу x до поверхні. При переході до буферного шару вміст Cd також збільшувався (як показано на рис. 3.2). Аналіз впливу варізонних широкозонних шарів на час життя та спектральні характеристики фото-ЕРС зразків гетероструктур на основі КРТ показав, що присутність вбудованого електричного поля, обумовленого градієнтом ширини забороненої зони, який визначається виразом (3.1) [40], призводить до значного зниження впливу поверхневої рекомбінації. Зокрема, при градієнті ширини забороненої зони з параметром $a > 10^4 \text{ см}^{-1}$ впливом поверхневої рекомбінації можна знехтувати.

$$a = \frac{E_{g0} - E_{gd0}}{2kTd_0}, \quad (3.1)$$

де E_{g0} – ширина забороненої зони на поверхні при $d = 0$; E_{gd0} – ширина забороненої зони при $d = d_0$; d_0 – товщина варізонного шару.

Розподіл складу x по товщині структури приведено на рис. 3.2.

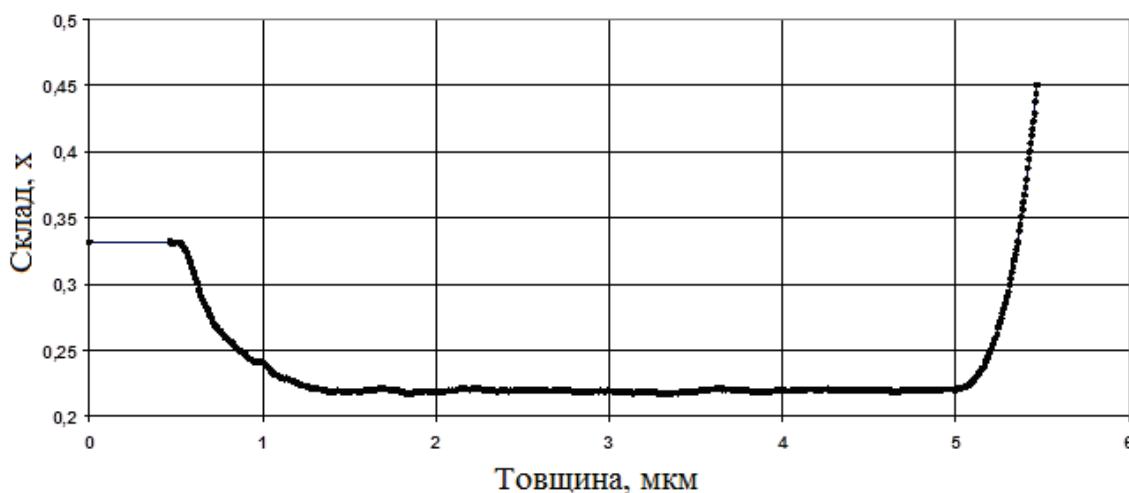


Рисунок 3.2 – Профіль складу за товщиною в шарах КРТ, виміряний за допомогою автоматичного еліпсометра в процесі росту матеріалу

З наведеного на рис.3.2 профілю одержаних плівок видно, що нижній шар плівки КРТ є по суті матеріалом змінного складу. Вміст кадмію в ньому зменшувався від 0,33 до 0,22 по мірі росту плівки. Товщина цього шару становила 1,25 мкм. Вміст кадмію в проміжному шарі був незмінний на рівні 0,22. Товщина цього шару становила близько 4 мкм. Верхній шар плівки КРТ також є матеріалом змінного складу. Вміст кадмію в ньому зростав від 0,22 до 0,45 по мірі росту плівки. Товщина цього шару становила 0,4 мкм.

Відомо, що хімічний склад будь-якого твердого розчину визначає його енергетичну будову і зокрема ширину забороненої зони. Тверді розчини зі змінним хімічним складом по товщині плівки називають варізонним матеріалом, тобто матеріалом із змінною величиною ширини забороненої зони. Таким чином, плівки КРТ, синтезовані в даній роботі, були трьохшаровими – нижній та верхній шари були варізонними матеріалами зі змінною величиною ширини забороненої зони, в той час як проміжний шар мав постійне значення вмісту кадмію і відповідно характеризується одним значенням ширини забороненої зони.

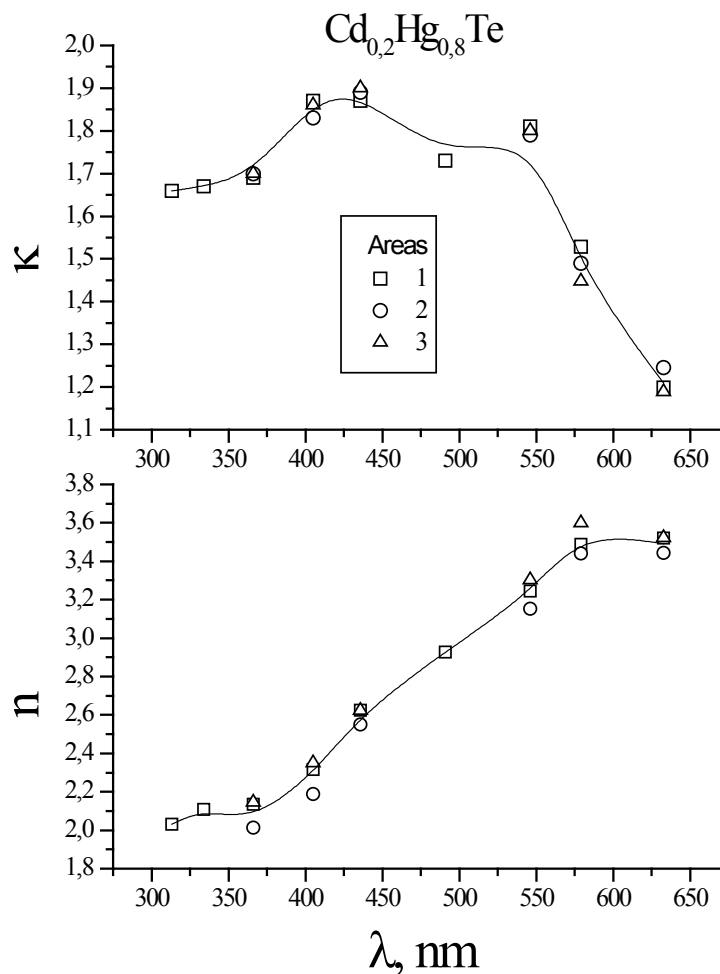


Рисунок 3.3 – Еліпсометричні вимірювання гетерошару $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ гетероструктури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$ ($x=0,23-0,33$)

Далі в роботі за допомогою еліпсометричних вимірювань були встановлені спектральні залежності показника екстинкції та заломлення (рис.3.3). Вимірювання проводились в спектральному діапазоні 320 – 640 нм. При цьому було встановлено, що в межах даного спектрального діапазону показник екстинкції змінювався від 1,65 до 1,15, показник заломлення – в межах від 2 до 3,6. З оптичних спектрів пропускання була визначена ширина забороненої зони матеріалу.

Схематичне зображення типової структури гетерошару КРТ на кремнієвій підкладці приведено на рис. 3.4, де також показана енергетична діаграма

області з варізонними шарами. Градієнт ширини забороненої зони на поверхні характеризується параметром $a \sim 16 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$.

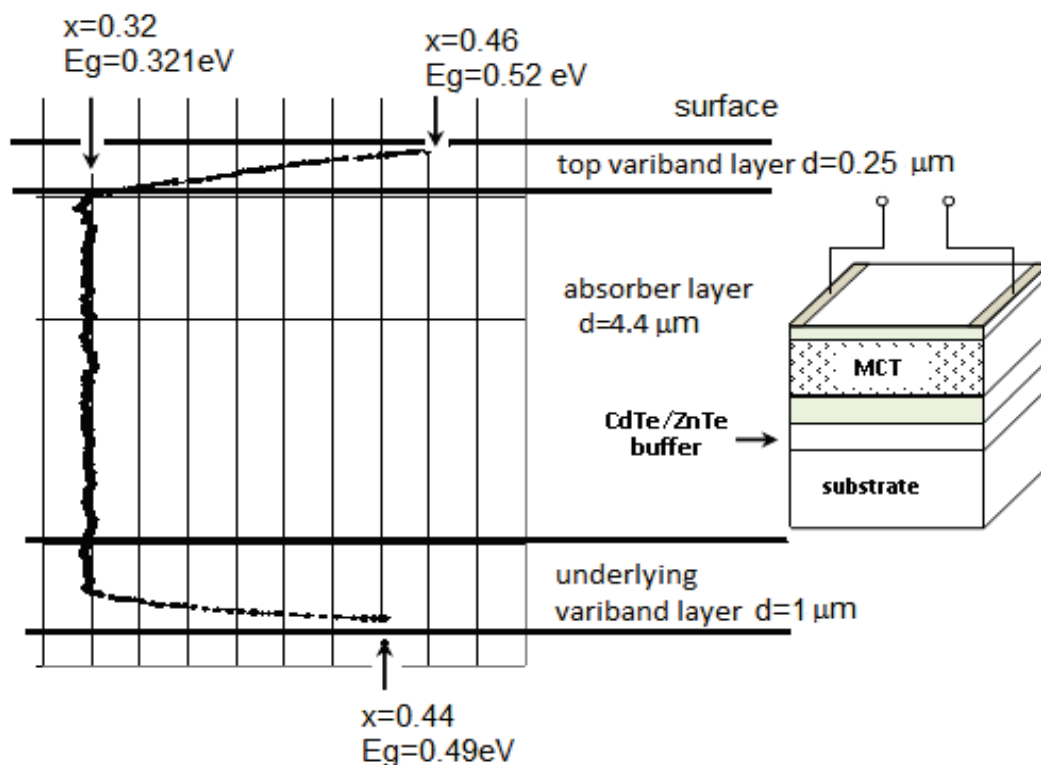


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення типової гетероструктури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$ з фотолітографічно нанесеними металевими контактами на поверхні та енергетична діаграма області з варізонними шарами

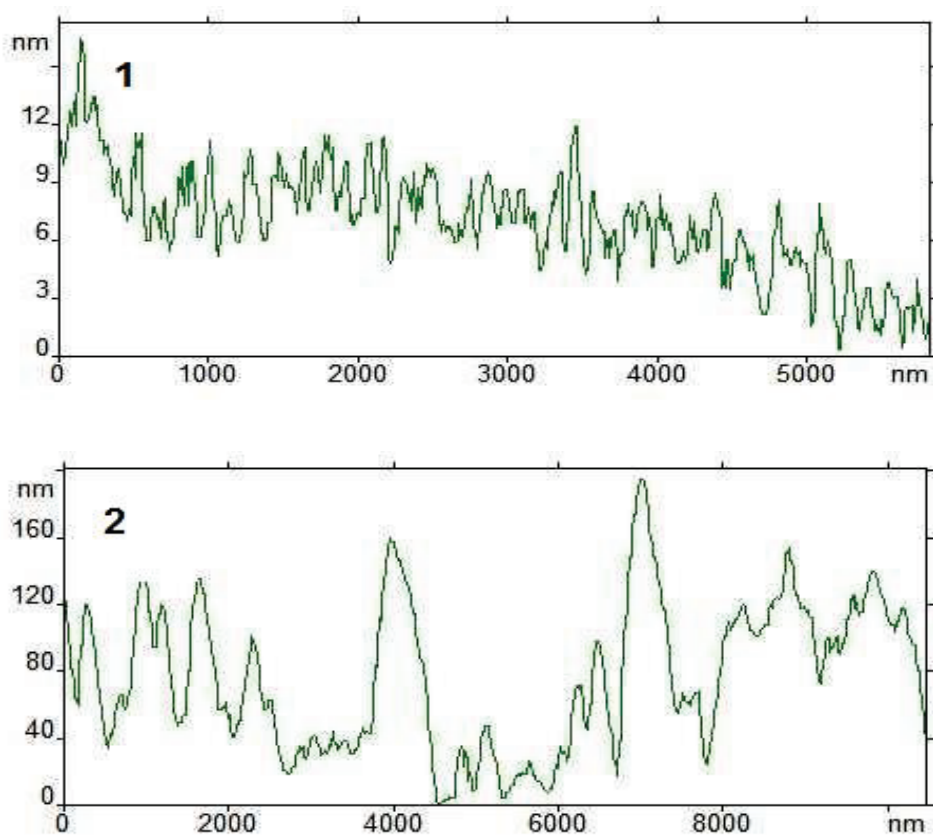
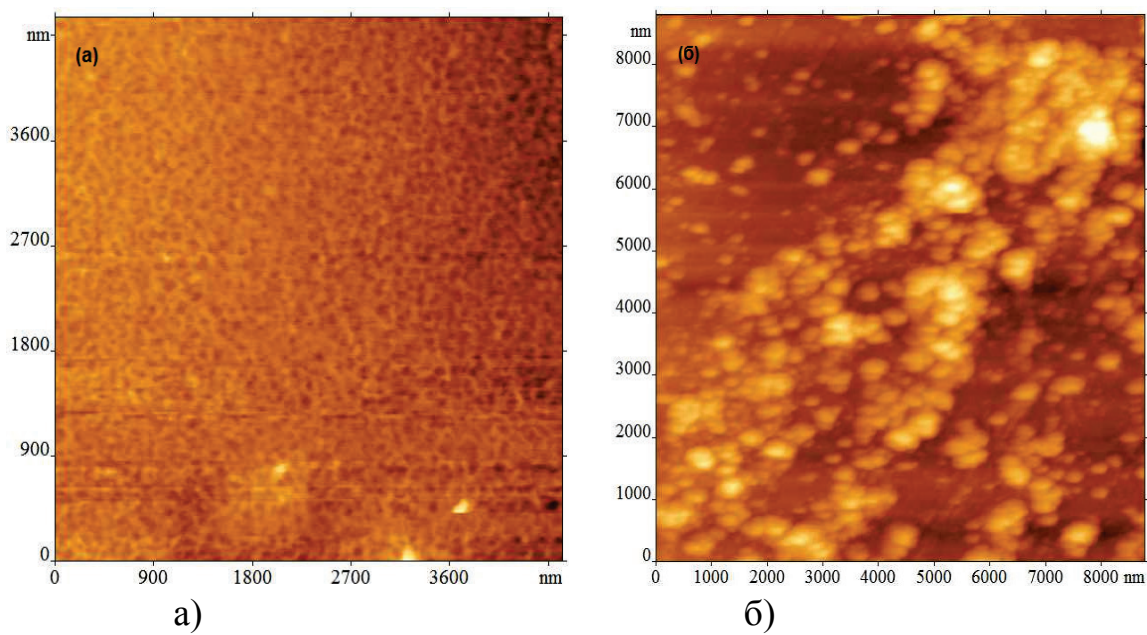
З наведеного рис. 3.4 видно, що для побудови ІЧ-приймача було обрано твердий розчин $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ трьохшарової структури. Верхній шар цієї структури являє собою варізонний матеріал товщиною 0,25 мкм. Товщина верхнього шару спеціально обирається якомога тоншою з тим, щоб зменшити додаткові втрати матеріалу на поглинання в ньому випромінювання. Хімічний склад розчину (x) змінювався в межах даного шару від 0,46 до 0,32, а ширина забороненої зони при цьому зменшувалась від 0,52 до 0,321 еВ. Проміжний шар, який відіграє роль абсорбера випромінювання, має сталу величину вмісту кадмію і ртуті у твердому розчині – 0,32, і відповідно сталі значення ширини забороненої зони – 0,321 еВ по всій товщині шару. Для забезпечення умов максимального поглинання падаючого випромінювання цей шар виготовляють найтовщим. Для

даного перетворювача цей шар становив 4,4 мкм. Найнижчий, буферний шар плівки КРТ характеризується підвищеним вмістом кадмію, ця величина зростала від 0,32 до 0,44 по мірі наближення до підкладки. При цьому ширина забороненої зони зазнає значної зміни: зростає від 0,321 до 0,49 еВ. Товщина буферного шару становила 1 мкм.

У роботі для порівняння також розглядається стан поверхні, оптичні та електричні властивості напівпровідникових гетероструктур $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te/CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$) (КРТ), які були отримані методом рідиннофазної епітаксії і піддавалися неорієнтованому опроміненню іонами B^+ з боку шару КРТ за допомогою імплантора «Везувій-5». Енергія імплантації становила 100 кеВ. Після імплантації зразки відпалювалися (5 год, 75°C) у атмосфері Ar^+ при надлишковому тиску 4 Бар. Режими температурної обробки вибиралися виходячи зі стабільності параметрів КРТ. Стан поверхні зразків контролювався методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) і еліпсометрії.

Імплантація зразків гетероструктур проводилася з метою вивчення ролі механічної деформації, яка є наслідком впровадження до твердого тіла (гетерошару) іонів.

Було виявлено, що імплантація бором з наступною термообробкою супроводжується зміною морфології поверхні зразків CdHgTe/CdZnTe . На рис. 3.5, а подано зображення вихідної поверхні типової гетероструктури з боку напівпровідника КРТ в атомно-силовому мікроскопі (АСМ). На рис. 3.5, б добре видно утворення рельєфу у вигляді „пухирців”, який з'явився на поверхні плівки кадмій-ртуть-телуру після імплантації бором. Рис. 3.5, в відображає профіль поверхні до і після іонної імплантації зразка. Після імплантації на рівні основного рельєфу (до 3 нм) сформувалися об'єкти субнанорозмірної висоти (від 60 до 120 нм).



в)

Рисунок 3.5 – АСМ-зображення плівки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$): а) вихідна поверхня плівки, б) поверхня плівки після імплантації та відпалу, в) профіль поверхні плівки до (1) та після (2) імплантації та відпалу

Величини оптичних параметрів зразків (коефіцієнти заломлення – n і екстинкції – k) визначалися експериментально зі сторони епітаксійного шару КРТ на лазерному еліпсометрі ЛЭФ-1М на довжині хвилі $\lambda = 628.3$ нм. Для інтерпретації отриманих даних було використано двошарову модель заломлюючої системи – порушений шар/шар CdHgTe на підкладці CdZnTe. Причому, оптичні властивості порушеного шару виявилися близькими до оптичних властивостей зовнішнього середовища – повітря. Значення коефіцієнтів n_n і k_n , а також товщина порушеного шару d_n для типового зразка наведено у табл. 3.1. Виявлено, що при введенні у приповерхневу область CdHgTe імплантат призводить до утворення шару завтовшки 0.35-0.38 мкм. Низькотемпературна витримка зразків практично не впливає на оптичні характеристики імплантованих бором епітаксiальних плівок КРТ (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Величини вимірюваних еліпсометром коефіцієнта заломлення та екстинкції імплантованих плівок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$)

Операції	d_n , мкм	Оптичні параметри	
		n_n/n	k_n/k
До імплантації	-	- / 3,87	- / 1,17
Після імплантації	0,38	1,029 / 3,56	0,098 / 0,67
1-й відпал	0,38	1,024 / 3,85	0,097 / 1,138
2-й відпал	0,35	1,04 / 3,5	0,096 / 1,21

Хімічний склад x твердого розчину $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ визначався із спектрів оптичного пропускання, які були отримані при кімнатній температурі на Фур'є-спектрометрі Infracum FT-801 з роздільною здатністю 2 см^{-1} у спектральному діапазоні 3-14 мкм. Відносна величина пропускання T зразків $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$) до обробки в середньому становить близько 50%, тоді як після проведеної імплантації та відпалу пропускання гетероструктури у досліджуваному спектральному діапазоні зменшилося до 10%. Змінився також

характер спектрального розподілу $T(\lambda)$. Для наочності, спектри пропускання типового зразка $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$) до і після імплантації (рис. 3.6, крива 1 і 2 відповідно) зведено до одиниці. Спектр пропускання імплантованої гетероструктури характеризується, по-перше, складною формою і, по-друге, появою характерних смуг. Наприклад, появою додаткової області поглинання із краєм $\lambda_1 = 9,94$ мкм. Обом кривим відповідає край поглинання ($\lambda_2 = 6,60$ мкм), що відповідає твердому розчину $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,223$), який практично не зазнає зміни (крива 1 і крива 2). Після імплантації та відпалу зразки виявилися фоточутливими при кімнатній температурі. Спектральна залежність чутливості $S_V(\lambda)$ зразків у фотовольтаїчному режимі на випромінювання стрижня глобара реєструвалося на опорній частоті модуляції світлового потоку $f_{\text{мод}} = 40$ Гц за методикою синхронного детектування сигналу. Застосовувався ІЧ спектрометр SPM-2 з NaCl призмою і нановольтметр УНИПАН – 232 В. Контакти на поверхні зразка при вимірах спеціально захищалися світлозахисним екраном. Омічний темновий опір був у межах 10-20 Ом. Слід зазначити, що спектральний діапазон максимальної фоточутливості збігається з областю спектра пропускання, у якій досліджувана гетероструктура має смуги поглинання.

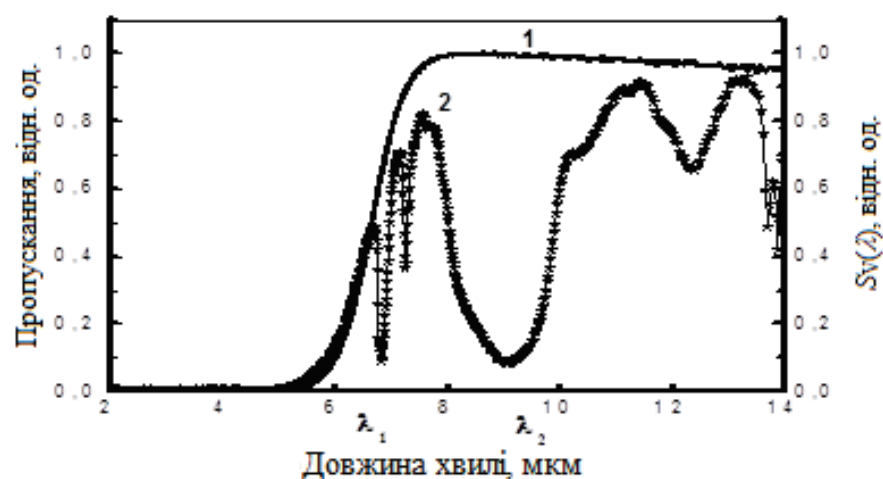


Рисунок 3.6 – Спектри пропускання зразка $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$):

1 – до імплантації; 2 – після імплантації та відпалу

3.2. Електрофізичні характеристики плівок CdHgTe та гетероструктур на їх основі

В роботі були виготовлені гетероструктури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$ методом молекулярно-променевої епітаксії, конструктивні та електрофізичні параметри яких наведені у табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики типового зразка гетероструктури для неохолоджуваного фотовольтаїчного перетворювача на основі напруженої гетероструктури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$

Основні характеристики зразка ГЕС КРТ МПЕ	
1. Матеріал підкладки, орієнтація	Si (310)
2. Площа зразка, см^2	-
3. Товщина першого буферного шару ZnTe, мкм	0,1
4. Товщина другого буферного шару CdTe, мкм	6,3
5. Товщина фоточутливого однорідного шару КРТ, мкм	3,7
6. Товщина нижнього (внутрішнього) варізонного шару КРТ, мкм	1,3
7. Товщина верхнього (зовнішнього) варізонного шару КРТ, мкм	0, 4
8. Склад робочого шару, X_{CdTe}	$0,229 \pm 0,002$
9. Відхилення складу по товщині фоточутливого однорідного шару, ΔX_{CdTe}	$\pm 0,002$
11. Розкид складу $\Delta X_{\text{CdTe}}/\Delta L$, см^{-1}	$< 0,001$
12. Тип електропровідності	дірковий
13. Концентрація основних носіїв заряду, см^{-3}	$8,6 \cdot 10^{15}$
14. Рухливість основних носіїв заряду, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	377
15. Провідність, $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	0,53

В табл. 3.3 наведено лінійні коефіцієнти термічного розширення матеріалів, а також значення постійних решіток для КРТ, кремнію та галій-арсеніду для порівняння.

Таблиця 3.3 – Лінійні коефіцієнти термічного розширення складових матеріалів КРТ і підкладок

Матеріал	Лінійний коефіцієнт термічного розширення, (10^{-6}K^{-1})							Параметр решітки
Т, К	80	100	200	300	400	500	600	0,5431
Si	-0,50	-0,34	1,43	2,54	3,05	3,39	3,68	0,6477
CdTe	0,40	1,38	4,09	4,96	5,10	5,26	5,45	0,646
HgTe	1,35	2,33	4,49	4,80	-	-	-	0,6542
GaAs	1,15	2,05	4,93	5,82	6,23	6,81	6,98	0,546

Розвиток ІЧ систем бачення на основі CdHgTe та конкуренція з приладами на основі квантово-розмірних ефектів, демонструє тенденції в сторону переходу від гібридних матричних фотоприймальних пристроїв на основі CdHgTe до мультиспектральних повноформатних монолітних ФПП на основі Si та Ge. Логічним кроком інтеграції буде використання кремнію в якості матеріалу підкладки для епітаксії КРТ. В першу чергу, через дешевизну та структурну досконалість кремнію, а також через прозорість у необхідному ІЧ діапазоні (майже до 25 мкм). При всьому цьому існують певні технологічні труднощі при вирішенні даного завдання. Однією з головних проблем є неузгодженість кристалічних структур та величин постійних решіток кристалів (табл. 3.3): $a_{\text{Si}} = 0,541$ нм, $a_{\text{CdTe}} = 0,6477$ нм та $a_{\text{HgTe}} = 0,646$ нм. Відмінність становить для $(a_{\text{КРТ}} - a_{\text{Si}}) = 19,15$ %.

Для зразків гетероструктур CdHgTe/CdZnTe значення концентрації і рухливості основних носіїв заряду визначалися за методом Ван-Дер Пау при $T = 78-300$ К в області магнітних полів 0,05-0,7 Тл. Обробка експериментальних магнітопольових залежностей коефіцієнта Хола R_H і провідності σ показала, що у вихідному стані плівка КРТ має n -тип провідності. Причому, виявлено присутність двох типів носіїв – «важких» ($n_1 = 4,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $\mu_{n1} = 0,322 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) і «легких» ($n_2 = 5,0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $\mu_{n2} = 8,0 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) електронів. Імплантація та «відпал» типового зразка привели до зростання концентрації «важких» електронів (до $n \sim 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$) та незначному зменшенню їх рухливості. Внесок «легких» електронів не виявлено. Також було проведено досліджування імпедансу зразків гетероструктур CdHgTe/CdZnTe. Металеві смугові контакти розташовувалися безпосередньо на зразку гетероструктури таким чином, щоб між ними перебувала імплантована область КРТ. Виміри виконувались прецизійним вимірником імпедансу LCR-819 у температурному інтервалі 78-300 К.

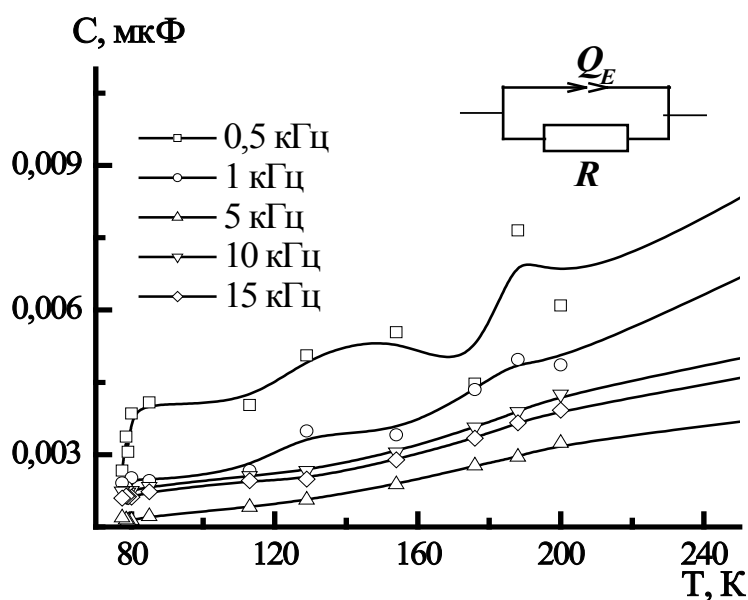


Рисунок 3.7 – Температурна залежність ємності зразка гетероепітаксимальної структури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ ($x \sim 0,223$) та її ЕЕС

На рис. 3.7 наведено еквівалентну електричну схему (ЕЕС) досліджуваної гетероструктури. Беручи до уваги неідеальну поведінку межі поділу для опису

резистивно-ємнісних властивостей досліджуваної гетеросистеми, ємнісний елемент представлено елементом з постійною фазою (CPE – constant phase element), позначений на малюнку символом Q_E . Імпеданс цього елемента описується співвідношенням [41]:

$$Z_{QE} = (A_0(j\omega)^n)^{-1}, \quad (3.1)$$

де A_0 – частотно-незалежний множник; ω – кругова частота; n – показник ступеня, що визначає характер частотної залежності ($-1 \leq n \leq 1$) та неідеальності такого конденсатора.

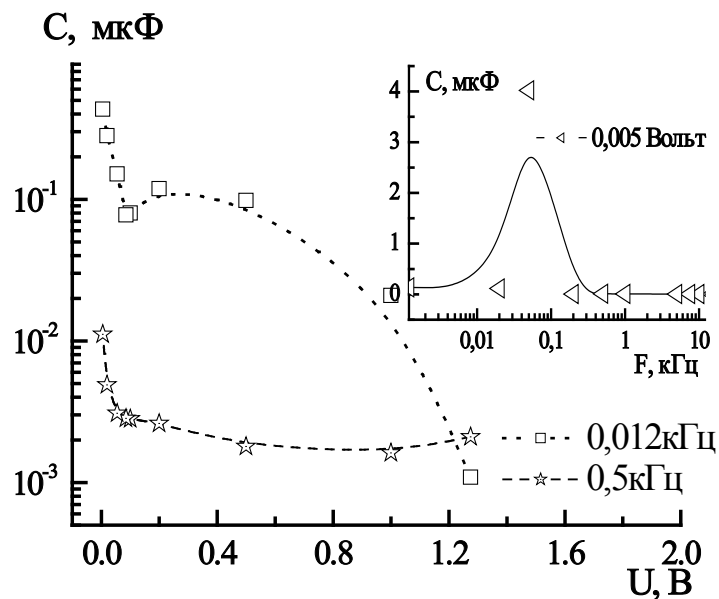


Рисунок 3.8 – CV-характеристики гетероепітаксiальної структури $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ ($x \sim 0,223$) та залежність ємності даної структури від частоти сигналу (у вставці)

Було виявлено, що досліджувані структури після імплантації та відпалу мають ємність, яка залежить як від температури (рис. 3.7), так і від частоти (рис. 3.8). Причому, на низьких частотах (до 10^2 Гц) температурні і частотні залежності мають особливості. Із частотної залежності ємності зразка структури $Cd_xHg_{1-x}Te/CdZnTe$ ($x \sim 0,223$), відповідно до виразу $f_{max} \cdot \tau_M = 1$ [41] визначено час релаксації провідності τ_M . Для кривої, що зображено на вставці до рис. 3.8, пік ємності припадає на $f_{max} = 0,05$ кГц, що відповідає часу релаксації

провідності $\tau_M = 3$ мс за кімнатної температури. Слід зазначити, що CV-залежності досліджуваних зразків (рис. 3.8) було отримано тільки на низьких частотах, тоді як при підвищенні частоти $>10^3$ Гц ємність структури не змінювалась в залежності від амплітуди напруги, що прикладалася до зразка.

3.3. Оптичні властивості плівок CdHgTe та фотоприймачів на їх основі

Зразок детектора для дослідження спектрального відгуку був виготовлений на базі гетероструктури $\text{Cd}_{0,32}\text{Hg}_{0,68}\text{Te/Si}$ з площею приймаючої області $\sim 1 \text{ мм}^2$, площею електроду $\sim 0,01 \text{ мм}^2$, і міжелектродною відстанню $\sim 1 \text{ мм}$ (рис.3.9).

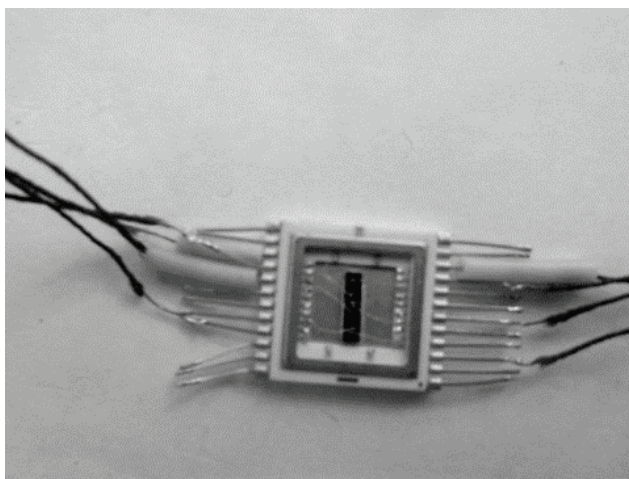


Рисунок 3.9 – Корпусований зразок CdHgTe/Si для вимірювань ФП

Для зразка було отримано спектральний розподіл фоточутливості $S_V(\lambda)$ (рис.3.10) на ІЧ-спектрометрі SPM-2 з призмою NaCl при кімнатній температурі ($T = 300 \text{ K}$) у фотовольтаїчному режимі в діапазоні довжин хвиль (1-15) мкм.

Сигнал знімався нановольтметром УНІПАН – 232 В. Джерелом інфрачервоного випромінювання був глобар нагрітий до 1350 K . В якості зразкового датчика, по відношенню до об'єкта дослідження, був задіяний піроелектричний датчик марки ПМ-4. Спектральний розподіл чутливості зразка визначався для двох опорних частот модуляції світлового потоку $f_{\text{мод1}} = 40 \text{ Гц}$ і $f_{\text{мод2}} = 338 \text{ Гц}$ за методикою синхронного детектування сигналу.

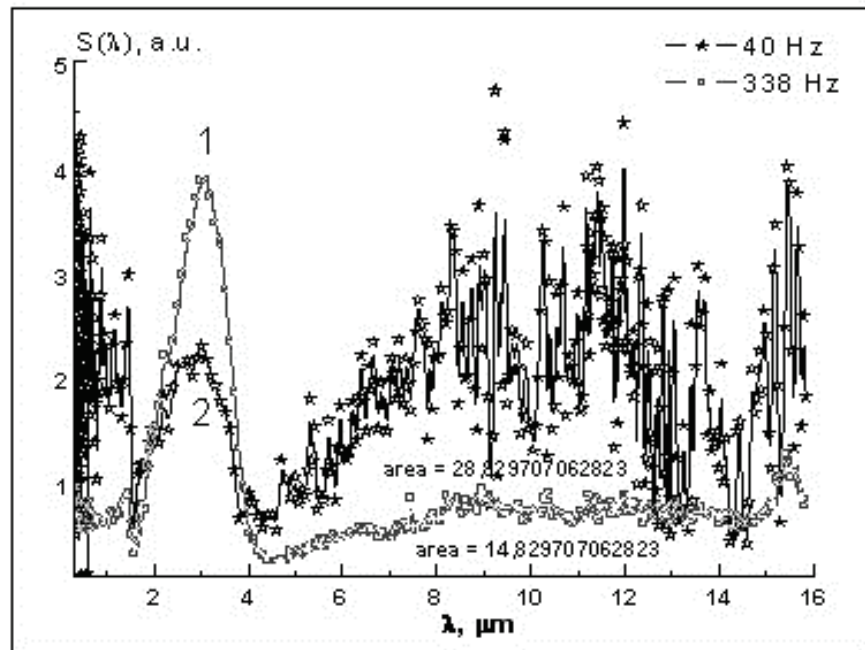


Рисунок 3.10 – Спектральний розподіл чутливості зразка $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}/\text{Si}(310)$ при частотах модуляції (1) – $f_{\text{мод1}} = 338$ Гц та (2) – $f_{\text{мод2}} = 50$ Гц відповідно

Інтегральна вольтова чутливість оцінювалась із співвідношення $S_{v\lambda_{\text{max}}} \cdot S_v(\lambda) / P_{\text{ел.}}$, шляхом інтегрування експериментальної залежності $S_v(\lambda)$, де $S_{v\lambda_{\text{max}}}$ – максимум чутливості ($\lambda_{\text{max}} = 2,7$ мкм, рис. 3.10).

Величина шумової складової $(u_{\text{ш}}^2)^{0,5}$ обиралася як для фотонного ПЧ-приймача на рівні $1,236 \cdot 10^{-8}$ В. Звідки, для смуги $\Delta f = 1$ Гц величина $D^* = 3 \cdot 10^8$ ($\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$) і $\text{NEP} = 5 \cdot 10^{-9}$ ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$).

Для оцінювання вкладів середовища було проведено вимірювання спектральної чутливості при різному способі теплового закріплення зразків (рис. 3.11).

Видно, що пік чутливості зразка не сильно залежить від способу теплового закріплення і знаходиться в межах 2,7-3,3 мкм (близько 2,7 мкм за кріплення з чорнінням та на ізоляторі, близько 3,3 – вільно чи на радіаторі). При чому при кріпленні на ізоляторі дещо збільшується чутливість у більш ближньому діапазоні спектра 1,5-2,5 мкм, тим самим округлюючи саму криву залежності.

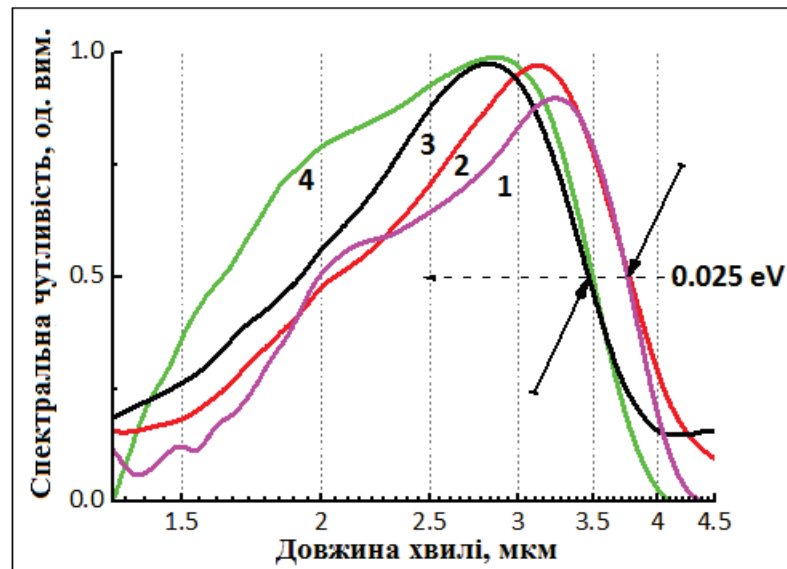


Рисунок 3.11 – Відносна спектральна чутливість зразка $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}/\text{Si}(310)$ гетероструктури в залежності від теплового закріплення: 1 – на радіаторі (алюміній); 2 – вихідний (вільно); 3 – з чорнінням; 4 – на ізоляторі ($f_{\text{мод}} = 338$ Гц; $T=296$ К)

4. РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕОХОЛОДЖУВАНОГО ІЧ-ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУРИ CdHgTe/Si

Характерною властивістю складної структури типу CdHgTe/CdTe/ZnTe/Si є присутність залишкових механічних деформацій, обумовлених різницею деформаційних потенціалів та лінійних коефіцієнтів розширення матеріалів підкладки та плівки.

Напружений стан кристалічної решітки твердотільних елементів мікроелектроніки використовують для поліпшення їх електричних і оптичних властивостей. Наприклад, значне підвищення рухливості дірок в MOSFET на базі SiGe досягається із використанням латеральних деформацій [40]. Важливим фактором для напружених твердотільних структур, вирощених вздовж полярної кристалографічної вісі, є п'єзоелектричне поле, яке у випадку напівпровідникового матеріалу змінює фізичні властивості. Оцінка та теорія виникнення п'єзополів у напружених напівпровідникових гетероструктурах наведено у [40], а потім експериментально доведено у [41]. Поля, що перевищують 10^5 В/см експериментально спостерігалися для матеріалів групи $A^{III}-B^V$ [43] і $A^{II}B^{VI}$ [44]. Практичне використання напружених напівпровідникових гетероструктур корисно для електрооптики та нелінійної оптики [45]. Електричні поля такої величини можуть викликати накопичення електричного заряду, наприклад, у випадку польових транзисторів [46] і резонансних тунельних структур. Деформаційні п'єзоелектричні ефекти для квантових дрітків з матеріалів $A^{II}B^{VI}$ наведені у роботі [47]. У даній роботі гетероструктура КРТ розглядається у рамках анізотропної деформації. Такий підхід у детектуванні ІЧ-випромінювання є новим та дає можливість використання п'єзопотенціалу, що виникає на гетеромежі між шаром CdHgTe та підкладкою Si. В гетероепітаксialьних плівках CdHgTe відповідної кристалографічної орієнтації, при обмеженні деформації з боку підкладки Si, виникають ненульові зсувні компоненти тензора деформацій, що призводить до п'єзоелектричної поляризації P напівпровідникового матеріалу. А оскільки

$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ має п'єзоелектричні властивості, то наслідком наявних деформацій буде поява електрорушійної сили (ЕРС) в епітаксильній плівці внаслідок просторового розділення фотозбуджених носіїв заряду п'єзоелектричним полем. Для запропонованого ІЧ фотоприймального пристрою на основі гетероструктури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Si}$, який є швидкодіючим, фотовольтаїчним за принципом дії та не потребує охолодження, експериментальним шляхом було:

а) визначено величину механічних напружень в п'єзоелектричній плівці структури $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$;

б) проведено моделювання фототермічної деформації напруженої багатошарової тонкоплівкової напівпровідникової гетероструктури CdHgTe/Si як результат поглинання ІЧ-випромінювання залежно від архітектури та значень механічних напружень.

Визначити деформації, що виникають через неузгодженість кристалічних решіток матеріалів гетероструктури, досить непросте завдання. Тому в роботі ми скористались апроксимацією таких величин, як ростові деформації.

Деформаційний стан шарів за температури росту $\alpha(T_p)$ можна розрахувати з залишкових напруг σ та термопружних напруг $\alpha(T)$, що виникають при охолодженні зразків до кімнатної температури через різницю коефіцієнтів температурного розширення КРТ та кремнію.

В роботі [41] було визначено, що величина залишкової деформації такої структури досягає десятків МПа і є розтягуючою за природою. За нормальних умов кристалічна симетрія твердих розчинів КРТ відноситься до групи $F43m$ і кристалічна ґратка характеризується однією незалежною п'єзоконстантою e_{14} . Отже, залишкові деформації в цьому матеріалі можуть індукувати електричне поле або поверхневий заряд [42].

Проте, в елементарній комірці $A^{II}B^{VI}$ власна полярність скомпенсована і тому при будь-яких скалярних впливах на кристал, в тому числі і при однорідній зміні температури, у «вільних» кристалах структури сфалериту (у тому числі і КРТ) полярні властивості не проявляються. Компенсація електричної полярності

може бути порушена в спеціально орієнтованих пластинках (шарах) кристалів групи $A^{II}B^{VI}$, а саме, при анізотропному обмеженні однорідної деформації.

Як відомо, в напружених гетероструктурах $A^{II}B^{VI}$, вирощених на кристалографічних площинах з високими індексами, спостерігають ефекти, пов'язані з п'єзополем, що генерується вздовж осі росту [43]. Для нашого випадку встановлено, що індукована термодеоформацією поляризація не виникає при орієнтації плівки КРТ у напрямках [100], [010], [001], тоді як при орієнтації в напрямку [111] та [310] поляризація повинна з'явитися у площині плівки [41].

Необхідно також враховувати вбудоване електричне поле, обумовлене присутністю варізонних шарів в досліджуваній структурі, дія якого об'єднана з дією п'єзополі очевидно призводить до утворення області збіднення та просторового розділення носіїв заряду. Останнє, в свою чергу, створює умови детектування фотонапруги зразком ФПП при кімнатній температурі на рівні $\sim 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Плівка вузькощілинного напівпровідника кадмій-ртуть-телур (CdHgTe) вирощена методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) на підкладках кремнію у вигляді гетероструктур $\text{CdHgTe}/\text{Si}(310)$ [48].

Наслідком складної механічної деформації гетероструктури $\text{CdHgTe} / \text{Si}(310)$ буде генерація п'єзоелектричного сигналу $U = q/C = (F \cdot d_{ik})/(\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S/a)$, де S – площа контакту, м^2 , a – відстань між контактами, м , ϵ_0 , ϵ – діелектрична проникність вакууму та матеріалу плівки відповідно, d_{ik} – п'єзомодуль матеріалу плівки, Кл/м .

Для оцінки залишкових механічних напружень у гетерошарі КРТ було використано зміна радіуса кривизни (ΔR), яку оцінено зі зміни положення максимуму брегівського кута, до і після осадження шару структури. Холівські вимірювання дозволили оцінити параметри перенесення для основних носіїв заряду ($p \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p \sim 230 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при 80 К). Доведено, що в епітаксialьних плівках $\text{CdHgTe}/\text{Si}(310)$ за рахунок співвідношення товщини плівка/підкладка технологічно реалізована умова обмеження механічних деформації тонкої плівки ($\sim 10 \text{ мкм}$) підкладкою (300 мкм).

Внаслідок цього у гетерошарі CdHgTe виникають ненульові зсувні компоненти тензора деформацій, що викликають п'єзоелектричну поляризацію цього напівпровідникового матеріалу. Отже, при поглинанні у плівці CdHgTe ІЧ випромінювання з довжиною хвилі, якій відповідає енергія більша, ніж ширина забороненої зони E_g , релаксація фотозбудження призводить до теплового розширення та дилатації кристалічної ґратки напівпровідника, що пов'язано з надлишком електронів у зоні провідності. Загалом, на границі напівпровідникової гетероструктури виникають механічні напруги σ обумовлені, по-перше, деформацією гетеромежі між плівкою і підкладкою внаслідок відмінності лінійних коефіцієнтів теплового розширення матеріалів підкладки і плівки (ε_T) та генерацією у плівці вільних носіїв (ε_{el}) [48]:

$$\sigma = k \cdot (\varepsilon_T + \varepsilon_{el}) = k \cdot ((\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T + 1/3 \sum \Delta n \cdot \partial \varepsilon_g / \partial p), \quad (4.1)$$

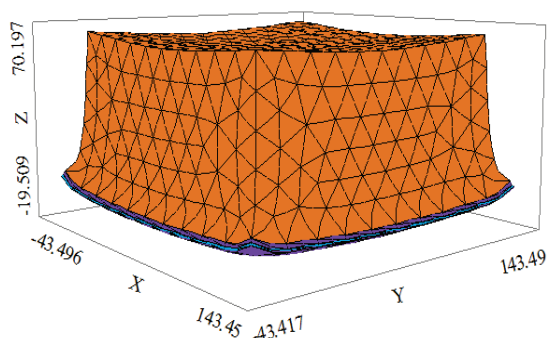
де $k = E/3 \cdot (1 - 2\nu)$, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, $\alpha_{1,2}$ – лінійний коефіцієнт теплового розширення матеріалів підкладки та плівки, $\Delta n = (\beta \cdot \tau \cdot I)/V$ – концентрація фотозбуджених носіїв заряду, β – квантова ефективність матеріалу, τ – час життя носіїв заряду, V – об'єм, у якому поглинається випромінювання з інтенсивністю I , ΔT – нагрів. Причому, ґратка КРТ розширюється ($\partial \varepsilon_g / \partial p > 0$), а ґратка Si – стискається ($\partial \varepsilon_g / \partial p < 0$). Моделювання такої фототермічної деформації зображено на рис. 4.1.

Основними факторами, що визначають ступінь досконалості гетерошару на підкладці, є відмінності між їх параметрами кристалічної ґратки $\Delta a = a_s - a_l$ та, за рахунок різниці у лінійних коефіцієнтах термічного розширення напівпровідникових матеріалів гетеросистеми: $\Delta \alpha = \alpha_s - \alpha_l$. Механічні напруження гетерошару, що виникають за рахунок різниці у кристалічних параметрах матеріалів системи [48]:

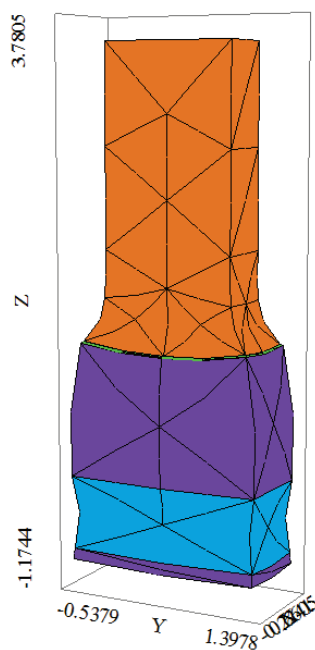
$$\sigma_{misfit} = \frac{E \varepsilon}{(1 - \nu)}, \quad (4.2)$$

де $\varepsilon = \Delta a / a_s$, E – модуль Юнга, ν – число Пуассона.

CMT - Si



CMT - Si



3d_CMT_Si: Grid#3 p2 Nodes=475 Cells=244 RMS Err= 0.0025

Рисунок 4.1 – Моделювання фототермічної деформації напруженої багатошарової структури CdHgTe/Si за допомогою ПЗ TCAD FlexPDE. Анізотропне обмеження деформацій у шарі CdHgTe за рахунок «жорсткого закріплення» на підкладці та поява нової системи координат

Оцінка показала значні напруження неузгодженості ($\sim 10^{10}$ Па), що повинні виникати у всіх зразках системи «гетерошар КРТ/підкладка». Однак, досягнення в галузі технологій вирощування саме складних за архітектурою структур дозволяють в значній мірі компенсувати ростові деформації, що виникають внаслідок неузгодження кристалічних параметрів напівпровідникових матеріалів. Відомий спосіб зменшення механічної напруженості у напівпровідниковій гетероструктурі полягає у використанні проміжних шарів, які використовуються для узгодження між параметрами решіток гетерошарів. У процесі росту, напруження зменшуються також за рахунок введення дислокацій неузгодженості. Напруження неузгодженості при збільшенні товщини d зменшуються та повністю релаксують при досягненні d_{cr} . Залежність від товщини має вигляд [48]:

$$\varepsilon(d) = \frac{d_{cr}}{d} \varepsilon_{init}, \quad (4.3)$$

Критична товщина для CdTe на кремнії $\sim 0,5$ нм [48]. При осадженні шару ZnTe критичне значення його товщини для випадку кремнієвої підкладки сягає $\sim 1,2$ нм [48]. Для CdTe товщина плівки $\sim 6,3$ мкм, що відповідає нашому випадку. Тоді виходячи із (4.1) та (4.2) значення $\sigma_{misfit}^* \sim 6$ МПа.

Ця величина є значно меншою за напруження, що виникають за рахунок термічного розширення матеріалів, які створюють гетеросистему [48]:

$$\sigma_{thermal} = \frac{\Delta\alpha\Delta TE_l}{(1-\nu_l)}, \quad (4.4)$$

де ΔT – різниця температур синтезування та робочої температури.

Для CdHgTe/Si(310) абсолютні значення термічних напружень $\sim 10^7$ Па відповідають літературним [48].

За результатами рентгенівської дифракції та використовуючи співвідношення Стоуні (4.5) залишкові напруження у плівках КРТ [48]:

$$\sigma_{\text{exp}} = \frac{E_s d_s^2}{6(1-\nu_s) d_l} \frac{1}{\Delta R} \quad (4.5)$$

де d_l та d_s – товщини гетерошару та підкладки, E_s та ν_s – лінійні модулі пружності для підкладки.

Розрахункові і термічні залишкові напруження, отримані відповідно до рівнянь (4.1)-(4.3), а також загальне абсолютне значення експериментально визначених залишкових напружень для гетероструктур складають від 2 до 15 МПа, що знаходиться в узгодженні із передбаченими даними. Шар ZnTe був проігнорований, виходячи із припущення, що товстий шар CdTe повинен домінувати у напруженнях, що виникають.

Таким чином, ми показали наявність залишкових механічних напружень у гетероструктурах на базі КРТ.

Далі розглянемо механічні деформації напруженого шару в гетероструктурі із невідповідністю у параметрах кристалічної ґратки в термінах локальної деформації уздовж осей координат. Загалом за формулою [48]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6)$$

де u_i і x_i – зміщення та координата повздовжньої кристалографічної вісі, відповідно. Для біаксіально деформованого матеріалу, що вирощений як (001) ці компоненти мають вигляд [49]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= 0 (i \neq j), \\ \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{22} = \varepsilon_{//}, \\ \varepsilon_{33} &= \varepsilon_{\perp} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Де символи \parallel та \perp вказують на x -у-площину та z -вісь, відповідно. Шар КРТ гетероструктури був вирощений у орієнтації (310), а основна система координат

x-y-z не співпадає із одиничною коміркою КРТ. Компоненти деформації в новій системі координат пов'язані, як $\varepsilon_{ij}'' = c_{im} c_{jn} \varepsilon_{mn}$.

Для шару КРТ вирощеного на поверхні (001) підкладки існують тільки розтягуючі (стискаючі) компоненти напружень деформації, які мають значення відмінне від нуля. У той же час, для гетроструктур КРТ, вирощених на поверхні (310) у-компоненти деформації зсуву, що діє на площині, перпендикулярній до осі x (ε_{xy}), а також x-компоненти деформації зсуву, що діє на площині, перпендикулярній вісь y (ε_{yx}) мають значення відмінне від нуля. Для випадку орієнтації поверхні (111) всі компоненти деформації мають значення відмінне від нуля.

Важливим фактором, що визначає структурні, оптичні та електричні властивості напівпровідникових гетероепітаксialних структур, є так звані ростові деформаційні поля, які виникають внаслідок відмінності постійних кристалічної решітки (a) і температурних коефіцієнтів лінійного розширення (α_T) шару та підкладки [39]. Яскравим прикладом практичного використання ростових деформацій є застосування напружених шарів Si і SiGe для збільшення рухливості носіїв або створення інверсної заселеності в лазерних структурах. Використання напружених шарів дозволило також створити новий клас тривимірних наноструктур із контрольованими розмірами й формою – нанотрубки й гофровані плівки [40]. Інший вид деформацій, які виникають у гетероструктурах, є наслідком будь-яких зовнішніх впливів або процесів. Наприклад, деформаційні поля, що утворюються в результаті впливу високоенергетичних потоків – радіаційного або лазерного опромінення, іонної імплантації та ін. Вони обумовлюють процес перетворення системи домішок і дефектів у гетероструктурах і визначають їхні кінцеві властивості, що робить актуальним вивчення закономірностей радіаційних технологій з врахуванням сильних і просторово неоднорідних зовнішніх і внутрішніх деформацій як з фундаментальної, так і з практичної точки зору. Як відомо, тверді розчини КРТ чутливі до технологічних процесів, які можуть стати причиною порушення

кристалічної структури розглянутого матеріалу. Особливо це стосується підґратки Hg-Te, тому що ентальпія утворення зв'язку Hg-Te ($\Delta hf = 7,69$ ккал/моль) низька в порівнянні з ентальпією зв'язку Cd-Te ($\Delta hf = 24$ ккал/моль) [41]. Математичне моделювання процесу іонної імплантації, проведене із застосуванням програмного пакета TRIM_2008, дозволило визначити, що при імплантації іонів B^+ з енергією 100 кеВ величина втрат (внаслідок віддачі енергії імплантатом у ядерну підсистему мішені через пружні взаємодії) становить 79,2 еВ/Å. Для такої енергії середнє значення проективного пробігу іона бору відповідає $R_p \sim 0,17$ мкм. Таким чином, у проімплантованій мішені КРТ трек одиничного іона B^+ утворює навколо себе область значного порушення кристалічної структури матеріалу. У результаті, приповерхнева область КРТ, максимально розупорядкована іонами B^+ , стає насиченою міжвузловою ртуттю Hg_i через проникнення атомів бору в катіонну підґратку матриці. Причому, область максимального розупорядкування по глибині, звичайно, не перевищує 0,5 мкм [42]. Наступний відпал в атмосфері Ar з протитиском сприяє дифузії ртуті Hg_i углиб зразка, тому що надлишковий тиск у камері перешкоджає руху ртуті до поверхні. Появи точкових дефектів і складних комплексів, у результаті зсуву навколишніх іонів, приводить до викривлення кристалічної ґратки матриці та, як наслідок, деформує епітаксіальну плівку досліджуваної структури. Механічні напруги в плівці КРТ, створювані при імплантації бором, можуть бути визначені зі співвідношення [48]:

$$\sigma(z) = \frac{C(z)\beta E}{(1-\nu)}, \quad (4.8)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль Юнга, z – координата, $C(z)$ – профіль розподілу введеної домішки, β – коефіцієнт стиску кристалічної ґратки, обумовлений розмірною невідповідністю атомів уведеної домішки та кристалічної ґратки матриці. Значення, визначене у [43], становить $\beta \sim 3 \cdot 10^{-31}$ м³. Профіль розподілу введеної домішки для типової імплантованої структури CdHgTe/CdZnTe був визначений з виразу [43]:

$$C(z) = C_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] + C_B, \quad (4.8)$$

$$C_{\max} = \frac{D}{\sqrt{2\pi en \Delta R_p}}$$

де $D = e \cdot n \cdot q = 4,8 \cdot 10^{-6}$ Кл/див², e – заряд електрона, R_p – проективний пробіг імплантованих атомів, $\Delta R_p = 0,125$ мкм, n – кратність заряду іона, C_B – вихідна концентрація, C_{\max} – максимальна концентрація домішки, що відповідає проекції пробігу. На рис. 4.2 наведено профіль розподілу бору в КРТ $C(z)$, розрахований зі співвідношення (4.8).

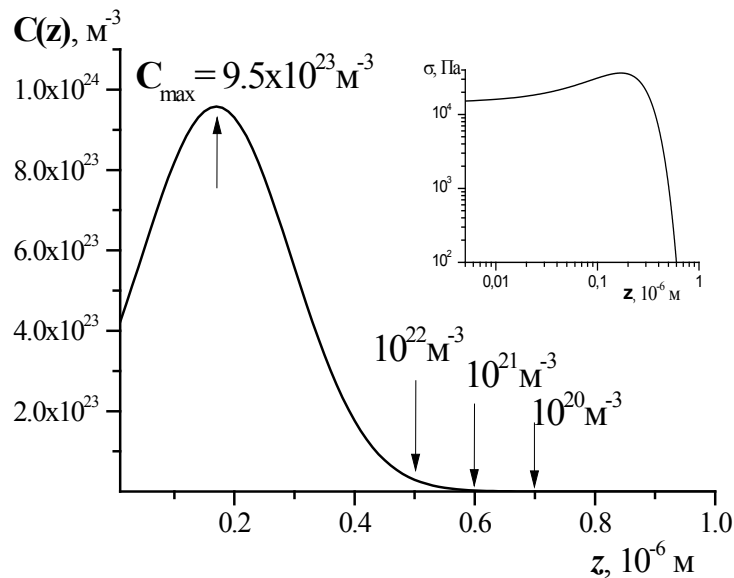


Рисунок 4.2 – Профіль розподілу домішок B^+ в плівці $Cd_xHg_{1-x}Te$ на підкладці $CdZnTe$ ($x \sim 0,223$) та розподіл механічних напруг від введеної домішки при низькоенергетичному опроміненні КРТ іонами бору по товщині розупорядкованого шару, отримані за допомогою програмного пакета TRIM_2008

Видно, що домішка розташовується переважно в приповерхневому шарі товщиною 0,4 мкм. Причому, максимального значення $\sim 10^{24}$ м⁻³ концентрація бору досягає на глибині близько 0,2 мкм. При $z > 0,4$ мкм, концентрація введеної домішки $C(z)$ убиває на порядки величини. Слід зазначити, що товщина порушеного шару, визначена методом еліпсометрії, близька по величині до

товщини шару, у якому спостерігається максимальна концентрація імплантату. Максимальне значення величини механічних напруг від уведеної домішки при низькоенергетичному опроміненні КРТ іонами бору спостерігається, як і слід було очікувати, у приповерхневому шарі, що відповідає області максимального розвпорядкування, і склало $\sigma_{\text{макс}} \sim 4 \cdot 10^4$ Па (рис. 4.2).

Поля механічних напруг, що створюються радіаційно-розупорядкованими шарами, ефективно зв'язують точкові дефекти, через що домішки швидко дифундують, наприклад, у кремнієвих пластинах. У нашому випадку можна говорити про вплив механічних напруг порушеного шару на дифузію міжвузлової ртуті. Відомо, що імплантація КРТ іонами малого радіуса (такими як B^+) приводить до стискання порушеного шару, тоді як імплантація іонами з радіусом, порівняним з Hg (наприклад, Ca або Cd), викликає розтягування порушеного шару. Таким чином, стискання приповерхневих шарів КРТ і, відповідно, розтяг більш глибоких шарів сприяє перерозподілу дефектів при відпалі структури. Причому, потік дефектів (Hg_i) нормально спрямований відносно поверхні зразка з області стискання в область розтягування. Очевидно, що дифузія міжвузлової ртуті вглиб зразка, обумовлена градієнтом концентрації Hg_i і посилена градієнтом механічних напруг, супроводжується заліковуванням вакансій ртуті V_{hg} , що приводить до посилення електронного внеску в провідність для КРТ, що в нашому випадку підтверджується результатами дослідження електрофізичних параметрів зразків до та після імплантації. Слід також зазначити особливості відгуку досліджуваної структури, на збуджуючий синусоїдальний електричний сигнал. Очевидно, що характер температурних і частотних залежностей ємності залежить від того, чи встигає процес переносу заряду йти за змінами прикладеної до структури змінної напруги, за допомогою якої здійснюється вимірювання. Спостереження низькочастотних особливостей (при 10 - 10^2 Гц) вказує на те, що процес перенесення заряду пов'язаний з міграцією іонів. Деяку аналогію можна провести з іонно-міграційною поляризацією в діелектриках, яка обумовлена наявністю в матеріалі шарів з різною провідністю, утворенням об'ємних зарядів, особливо при високих градієнтах напруги, і є поляризацією вповільненої дії.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування ІЧ-перетворювачів на основі КРТ/Si за кімнатних температур без охолодження	1. Військова галузь	Зменшення габаритів систем ІЧ-бачення, наведення та виявлення, спрощене користування
	2. Медицина	Зменшення габаритів обладнання для обстеження пацієнтів
	3. Енергетика	Виявлення теплових втрат
	4. Служби порятунку	Ефективний пошук постраждалих у НС, орієнтація в задимлених приміщеннях
	5. Транспорт	Орієнтація в умовах поганої видимості

Відрізняються від існуючих аналогів більшою чутливістю у ближньому ІЧ діапазоні (з піком у 2,7 мкм).

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			

1.	Економічні	1000 у.о.	500 у.о.	100 у.о.	2000 у.о.	+		
2.	Призначення	Детектор ближнього ІЧ-діапазону	Детектор середнього ІЧ-діапазону	Детектор середнього ІЧ-діапазону	Детектор ближнього ІЧ-діапазону			+
3.	Надійності	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років	Довговічність > 10 років		+	
4.	Технологічні	Працює без охолодження	Необхідна наявність охолодження	Необхідна наявність охолодження	Працює без охолодження			+
5.	Ергономічні	-	-	-	-		+	
6.	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7.	Естетичні	-	-	-	-		+	
8.	Транспортабельності	-	-	-	-		+	
9.	Екологічність	Екологічно	Екологічно	Екологічно	Екологічно		+	
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент 1: виробник ІЧ-систем наведення «Guidance Marine»

Конкурент 2: компанія-виробник військового ІЧ-обладнання «Reynard Corporation»

Конкурент 3: компанія виробник ІЧ-детекторів «Teledyne Dalsa»

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення ІЧ-датчика	Молекулярно-променева епітаксія	Наявна	Доступно
		Рідиннофазна епітаксія	Наявна, але не оптимізована під масове виробництво	Доступно

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	250%

Ринок є потенційно привабливим для входження, за умови налагодження великого виробництва.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Відмова від систем охолодження датчиків	Компанії-виробники ІЧ-обладнання (здебільшого для військових цілей)	-	Товар має успішно працювати в ближньому ІЧ-діапазоні за близьких до кімнатної температури без охолодження

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним, тому необхідна наявність персоналу з певними спеціалізованими навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та умови для проведення тестування його працездатності	Оренда приміщень виготовлення та тестування продукту, укладання договорів з науково-дослідними інститутами та поставниками ресурсів

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Сприяє розробці та виготовленню нових продуктів, покращенню методів виробництва	Покращення параметрів та характеристик товару
2.	Попит	Існування стійкого попиту говорить про зацікавленість споживача у покращенні якості товару	Покращення параметрів та характеристик товару, зменшення його вартості

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - чиста	На ринку присутня велика кількість різних компаній	Підвищення якості товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу

2. За рівнем конкурентної боротьби: - міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується країнами чи територіально	Створювання веб-сайту компанії, відкриття потужностей за кордоном
3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують аналогічні товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо	Постійний аналіз та пошук інформації щодо розробок, новинок, наявної продукції конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якості товару, зменшення його вартості
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	Передбачає можливість продажу продукції за нижчими цінами, ніж у конкурентів	Розробка дешевої технології виробництва для зменшення вартості продукту
6. За інтенсивністю: - немарочна	Роль торгової марки не є вирішальною	Рекламування продуктів компанії

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Guidance Marine», «Reynard Corporation», «Teledyne Dalsa»	Налагодження великого виробництва	Продаж та розповсюдженн я товару безпосередньо компанією- розробником	Вимоги до якості, надійності і вартості	Товари-замінники відсутні
Висновки:	Висока інтенсивність через давню присутність конкурентів на ринку	Потенційні конкуренти можливі, але не передбачаються	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Висока якість продукту, його надійність та доступність	Обмежень немає

Для здобуття конкурентоспроможності на ринку при розробці товару необхідно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та інженерів для вдосконалення технології виробництва, характеристик та якості товару.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Відсутність необхідності в охолодженні	Більшість продукції конкурентів все ще потребує використання систем охолодження, що значно збільшує вартість товару
2.	Якість розробки та високі характеристики товару	Продукт має однаково добре виявляти ІЧ-випромінювання за різних погодних умов, кутах нахилу, температури тощо
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та технології виробництва потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна продукції не має бути надто висока, щоб знайти потенційних покупців

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “ЗМ”						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Відсутність необхідності в охолодженні	20		+					
2.	Якість розробки та високі характеристики товару	16			+				
3.	Наявність наукових ресурсів	13					+		
4.	Економічний (ціна товару)	16				+			

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Відсутність необхідності в охолодженні, якість розробки та високі характеристики товару	Слабкі сторони: Наявність наукових ресурсів
---	---

Можливості: Зменшення ціни товару приведе до більшого попиту, а відтак і до збільшення інтересу у подальших наукових дослідженнях	Загрози: Відсутність досліджень для покращення технології приведе до її застою і зрештою, до зменшення попиту на товар
---	--

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок	60%	5 роки
2.	Пошук інвесторів, пошук компаній збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	80%	3 роки

Обрано альтернативу №2.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні установи	Висока	Високий	Висока	Середня
2.	Приватні підприємства	Середня	Середня	Низька	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	3	За рахунок великої зацікавленості військової сфери у якісних та менш громіздких засобів ІЧ-детектування можна добитися лідерства на ринку військового обладнання	Кращі характеристики товару за меншою ціною	Стратегія спеціалізації

Обрано стратегію спеціалізації.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока чутливість, менші розміри	Стратегія спеціалізації	Неохолоджувана система, чутливість	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Зменшення розмірів обладнання та залежності від охолодження	Неохолоджувана система	Конкуренти залежні від систем охолодження

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Слугування інкапсулянтom для з'єднання захисного скла із сонячним елементом з підвищенням його ККД		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Vp/Tx /Tл/E/Op
	1. Підвищення ККД ФЕП	M	
	2. Ціна 20 у.о./мм ²	M	
	3. Висока чутливість.	M	
	4. Неохолоджена система.	M	
	Якість: висока,		
	Пакування: пластини		
	Марка: "UNCRID"		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія		
	Після продажу: доставка, обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	10–40 у.о./мм ²	5000 у.о. і вище	10 – 30 у.о./мм ²

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, розподіл, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Безпосередній збут продукції покупцям від виробника

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Застосування товару у військовій сфері (системи протиракетної оборони, голівки самонаведення)	Прямі – інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Неохолоджувані системи, висока чутливість в ближньому ІЧ діапазоні випромінювання	Поширення знань про підприємство і характеристики товару серед можливих клієнтів	Звернення ґрунтується на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти.

5.6. Висновки

Можливість ринкового впровадження та комерціалізації проекту є значною через наявність відмітних характеристик товару та відсутність високої конкуренції на ринку. Ринок не охолоджуваних систем детектування інфрачервоного випромінювання у ближньому діапазоні тільки починає розвиватись, що потенційно веде до залучення більшого фінансування у майбутньому.

ВИСНОВКИ

Метою даної роботи була розробка прототипу фотодетектора інфрачервоного випромінювання із використанням п'єзоелектричного ефекту в гетероструктурі КРТ на підкладці Si, що працює без використання кріогенного охолодження.

Було встановлено, що п'єзовластивості CdHgTe дозволяють використовувати багат шарову гетероструктуру CdHgTe/Si для детектування інфрачервоного (ІЧ) випромінювання без застосування електричного зміщення і охолодження.

Для цього проведено математичний та фізичний експерименти, що підтверджують чутливість такої гетероструктури в ближньому ІЧ-діапазоні із піком у 2,7 мкм, для чого було отримано спектральний розподіл фоточутливості $S_V(\lambda)$ на при кімнатній температурі ($T = 300\text{ K}$) в діапазоні довжин хвиль 1-15 мкм.

Також за допомогою TCAD FlexPDE було отримано фізичну модель термомеханічних деформацій, що виникають на межі гетероструктури $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te/Si}$ ($x=0,3$) при $T=300\text{ K}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сизов, Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра / Ф. Ф. Сизов. – Киев: Академперіодика, 2008. – 459 с.
2. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
3. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон. – М.: Мир, 1972. – 536 с.
4. Ковтонюк, Н. Ф. Фоточувствительные МДП приборы для преобразования изображений / Н. Ф. Ковтонюк, Е. Н. Сальников. – М.: Радио и связь, 1990. – 160 с.
5. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков. – СПб.: Лань, 2002. – 480 с.
6. Киес, Р. Дж. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов / Р. Дж. Киес. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
7. Овсяук, В. Н. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / В. Н. Овсяук. – Новосибирск: Наука, 2001. – 241 с.
8. Пономаренко, В. П. Фотоэлектроника для нового поколения оптико-электронной аппаратуры / В. П. Пономаренко, А. М. Филачев // Прикладная физика. – 2002. – №6. – С. 13-24.
9. Бовина, Л. А. Фотодиоды и фотодиодные матрицы на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / Л. А. Бовина, В. И. Стафеев // Прикладная физика. – 1999. – №2. – С. 57-58.
10. Салмин, Е. А. Полевой транзистор со структурой МТДП на основе «кадмий-ртуть-теллур» / Е. А. Салмин, В. П. Пономаренко, В. И. Стафеев // Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22, №6. – С. 1142-1144.
11. Стафеев, В. И. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / В. И. Стафеев, К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, В. П. Пономаренко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, №10. – С. 1257-1261.
12. Богобоящий, В. В. Механизм конверсии типа проводимости при бомбардировке кристаллов $\text{p-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ионами малых энергий / В. В.

Богобоящий, И. И. Ижнин // Известия ВУЗОВ Сер. Физика. – 2000. – Т. 43, №8. – С. 16–25.

13. Пономаренко, В. П. Исследования инжекционного переноса тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / В. П. Пономаренко, В. И. Стафеев // Труды МФТИ. Сер. Радиотехника и электроника. – 1974. – №7. – С. 57-61.

14. Бовина, Л. А. Матричные фотоприемники формата 128×128 и 384×288 на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / Л. А. Бовина [и др.] // Прикладная физика. – 1999. – №3. – С. 32-41.

15. Бовина, Л. А. Исследование стабильности характеристик фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / Л. А. Бовина, В. И. Стафеев, К. О. Болтарь, В. М. Лакеенков // Прикладная физика. – 1999. – №3. – С. 41-48.

16. Болтарь, К. О. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм / К. О. Болтарь [и др.] // Оптический журнал. – 1996. – №6. – С. 74-77.

17. Burlakov, I. D. Multiply charged CHT-photoreceiver systems for spectral regions 3-5 and 8-12 microns / I. D. Burlakov [et al.] // Journal of Optical Technology. – 1996. – №6. – P. 62-66.

18. Boltar, K. O. Sensitive element dimension measurements in focal plane arrays / K. O. Boltar, N. I. Iakovleva // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3819. – P. 40-42.

19. Бочкарёв, Э. П. Выращивание твердых растворов КРТ / Э. П. Бочкарёв, В. М. Лакеенков, О. В. Пелевин // Материалы VII конференции по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и плёнок. – М., 1986. – С. 4-8.

20. Lakeenkov, V. M. Numeric Simulation of Vertical Bridgman Growth of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ melts / V. M. Lakeenkov, V. B. Utimtsev, N. I. Shmatov, Y. F. Schelkin // Journal of Crystal Growth. – 1999. – Vol. 197, №3. – P. 443-448.

21. Пономаренко, В. П. Теллурид кадмия-ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотозлектроники / В. П. Пономаренко // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, №6. – С. 650-665.

22. Fenner, D. B. Silicon surface passivation by hydrogen termination: A comparative study of preparation methods / D. B. Fenner, D. K. Biegelsen, R. D. Bringans // *Journal of Applied Physics*. – 1989. – №66. – P. 419-422.
23. Сидоров, Ю.Г. Исследование процессов формирования инфракрасного фотоприемника на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в монокристаллическом исполнении / Ю.Г. Сидоров [и др.] // *Оптический журнал*. – 2009. – Т. 72, №12. – С. 55-62.
24. Rheenen, A. D. Temperature dependence of the spectral response of lateral, MBE-grown, ion-milled, planar, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes / A. D. Rheenen, H. Syversen, R. Haakenaasen, T. Lorentzen // *Physica Scripta*. – 2006. – Vol. 126. – P. 101-112.
25. Якушев, М. В. Гетероструктуры HgCdTe на подложках $\text{Si}(310)$ для инфракрасных фотоприемников средневолнового спектрального диапазона / М. В. Якушев [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2011. – Т. 45, №3. – С. 396-402.
26. Haakenaasen, R. Depth and lateral extension of ion milled p-n-junctions in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ from electron beam induced current measurements / R. Haakenaasen, T. Moen, T. Colin, H. Steen // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – №91. – P. 427-429.
27. Reddy, M. MBE Growth of HgCdTe on Large-Area Si and CdZnTe Wafers for SWIR, MWIR and LWIR Detection / M. Reddy, J. M. Peterson, D. D. Lofgreen, J. A. Franklin // *Journal of Electronic Materials*. – 2008. – Vol. 37, №9. – P.1274-1282.
28. Sivananthan, S. Relation between Crystallographic Orientation and the Condensation Coefficients of Hg, Cd, and Te during Molecular-Beam-Epitaxial Growth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ and CdTe / S. Sivananthan, J. Reno, X. Chu, J.P. Faurie // *Journal of Applied Physics*. – 1989. – Vol. 60, №4. – P. 1359-1360.
29. Koestner, R. J. Kinetics of molecular beam epitaxial HgCdTe growth / R. J. Koestner, H. F. Schaake // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1988. – Vol. 6, №4. – P. 2834-2839.
30. Ryu, Y. S. Dependence of the structural and the electrical properties on the Hg/Te flux-rate ratios for $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ epilayers grown on CdTe buffer layers / Y. S.

- Ryu, B. S. Song, T. W. Kang, T. W. Kim // Journal of Materials Science. – 2004. – Vol. 39, № 3. – P. 1147-1149.
31. Carmody, M. Status of LWIR HgCdTe-on-Silicon FPA Technology / M. Carmody [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2008. – Vol. 37, №9. – P. 1184-1188.
32. Якимчук, Д. Ю. Исследование вольт-амперных характеристик гетеропереходов $p\text{-Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}/n\text{-PbTe}_{0.92}\text{Se}_{0.08}$ / Д. Ю. Якимчук, М. С. Давыдов, В. Ф. Чишко, В. В. Крапухин // Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22, №8. – С. 1474-1477.
33. Заитов, Ф. А. Диффузия в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ / Ф. А. Заитов, А. В. Горшков, Г. М. Шаляпина, Е. В. Сусов // Неорганические материалы. – 1979. – Т. 15, №11. – С. 2077-2078.
34. Галандаров, Г.А. Гетерофотодиоды $p\text{-PbSnTe}/n\text{-PbSeTe}$ с согласованными параметрами решёток / Г.А. Галандаров, Ф.М. Фараджев, Э.А. Акопян, А.А. Юсифов // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т.18, №1. – С. 185-186.
35. Бирюлин, П. В. Исследование характеристик фотодиодных линеек на InSb / П. В. Бирюлин, В. И. Туринов, Е. Б. Якимов // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, №4. – С. 498-503.
36. Дзумедзей, Р.О. Термоелектричні властивості твердих розчинів $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ / Р. О. Дзумедзей, І. В. Горічок, Л. І. Никируй, М. О. Галушак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, №2. – С. 369-373.
37. Дмитриев, А. В. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов / А. В. Дмитриев, И. П. Звягин // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, №2. – С. 821-838.
38. Шперун, В. М. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів / В. М. Шперун, Д. М. Фреїк, Р. І. Запыхляк. – Івано-Франківськ: Плай, 2000. – 250 с.
39. Гальперин, Ю. М. Кинетические явления в компенсированном $n\text{-InSb}$ при низких температурах / Ю. М. Гальперин, Е. М. Гершензон, И. Л. Дричко, Л. Б. Литвак-Горская // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24, №1. – С. 3-21.

40. Smith, D. L. Theory of semiconductor superlattice electronic structure / D. L. Smith, C. Mailhot // *Rev. Mod. Phys.* – 1990. – №62. – P. 173-234.
41. Laurich, B. K. Optical Properties of (100)- and (111)-Oriented GaInAs/GaAs Strained-Layer Superlattices / B. K. Laurich [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1989. – №62. – P. 649-650.
42. Sela, I. Excitonic optical nonlinearity induced by internal field screening in (211) oriented strained-layer superlattices / I. Sela [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1991. – №58. – P. 681-685.
43. Caridi, E. A. Direct demonstration of a misfit strain-generated electric field in a [111] growth axis zinc-blende heterostructure / E. A. Caridi, T. Y. Chang, K. W. Goossen, L. Eastman // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – №56. – P. 659-666.
44. Wan, C. F. Piezoelectric effects in HgCdTe devices / C. F. Wan, J. D. Luttmer, R. S. List, R. L. Strong // *Journal of Electronic Materials.* – 1995. – №24 – P. 1293-1297.
45. Ortiz, V. Efficient all-optical light modulation in a piezoelectric heterostructure at room temperature / V. Ortiz, N. T. Pelekanos, G. Mula // *Appl. Phys. Letters.* – 1998. – №72. – P. 963-967.
46. Fei, P. Piezoelectric Potential Gated Field-Effect Transistor Based on a Free-Standing ZnO Wire / P. Fei [et al.] // *Nano Letters.* – 2009. – №9. – P. 3435-3440.
47. Patil, S. Strain Effects and Temperature-Dependent Phase Stability of II-VI Semiconductor Nanostructures / S. Patil, B. Wen, R. V. N. Melnik // *AIP Conf. Proc.* – 2010. – №1199. – P. 303-310.
48. Tkhorik, Yu. L. Plastic Deformation and Misfit Dislocations in Heteroepitaxial Systems / Yu. L. Tkhorik, L. S. Khazan. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 304 p.
49. Arimoto, K. Elastic theory for strained heterostructures with in-plane anisotropy / K. Arimoto, K. Nakagawa // *J. Appl. Phys.* – 2008. – №104. – P. 2-8.